

Vergleichende photogeologische und geomorpho-
logische Untersuchungen in den Gebieten
Huayna Potosí, Apolo und Rurrenabaque
(Departamente La Paz und Beni, Bolivien)

Inaugural - Dissertation

zur Erlangung der Doktorwürde
des Fachbereichs 24 (Geowissenschaften)
der Freien Universität Berlin

vorgelegt von

Joachim Pohlmann
aus Berlin

Berlin 1976



Digitized by the Internet Archive
in 2026

**Vergleichende photogeologische und geomorpho-
logische Untersuchungen in den Gebieten
Huayna Potosí, Apolo und Rurrenabaque
(Departamente La Paz und Beni, Bolivien)**

Inaugural - Dissertation
zur Erlangung der Doktorwürde
des Fachbereichs 24 (Geowissenschaften)
der Freien Universität Berlin

vorgelegt von
Joachim Pohlmann
aus Berlin

Berlin 1976



1. Referent: Prof. Dr. F.K. List
2. Referent: Prof. Dr. H.-J. Schneider

Tag der mündlichen Prüfung: 9.7.1976

I N H A I T

=====

Seite

VORWORT

<u>1.</u>	<u>EINLEITUNG UND PROBLEMSTELLUNG</u>	7
1.1.	Einleitung	7
1.2.	Problemstellung	9
1.3.	Erforschungsgeschichte	9
<u>2.</u>	<u>ARBEITSGRUNDLAGEN</u>	11
2.1.	Luftbild- und Kartenmaterial	11
2.2.	Instrumente	13
<u>3.</u>	<u>ARBEITSMETHODEN</u>	14
3.1.	Qualitative Auswertung (Interpretation)	14
3.2.	Quantitative Auswertung (Messung)	15
3.2.1.	Kluftnetzmessung im Luftbild	16
3.2.2.	Klüftigkeit (K) und Kluftdichte (D_K)	17
3.2.3.	Entwässerungsnetz-Messung im Luftbild	18
3.2.4.	Entwässerungsdichte (D_E)	19
3.2.5.	Korrelation der Richtungsverteilungen von Kluft- und Entwässerungsnetzen	20
3.3.	Photogeologische Karte	24
<u>4.</u>	<u>LAGE UND GRÖSSE DER ARBEITSGEBIETE</u>	29
4.1.	Allgemeiner Überblick	29
4.2.	Gebiet HUAYNA POTOSÍ	29
4.3.	Gebiet APOIO	29
4.4.	Gebiet RURRENABAQUE	31
<u>5.</u>	<u>MORPHOLOGIE</u>	31
5.1.	Allgemeiner Überblick	31
5.2.	Gebiet HUAYNA POTOSÍ	32

5.3.	Gebiet APOLO	35
5.4.	Gebiet RURRENABAQUE	36
5.5.	Vergleich der drei Gebiete	36
<u>6.</u>	<u>KLIMA</u>	37
6.1.	Allgemeiner Überblick	37
6.2.	Gebiet HUAYNA POTOSÍ	41
6.3.	Gebiet APOLO	43
6.4.	Gebiet RURRENABAQUE	46
6.5.	Vergleich der drei Gebiete	46
<u>7.</u>	<u>VEGETATION</u>	50
7.1.	Allgemeiner Überblick	50
7.2.	Gebiet HUAYNA POTOSÍ	52
7.3.	Gebiet APOLO	54
7.4.	Gebiet RURRENABAQUE	55
7.5.	Vergleich der drei Gebiete	56
<u>8.</u>	<u>GEOLOGIE</u>	57
8.1.	Allgemeiner Überblick	57
8.2.	Gebiet HUAYNA POTOSÍ	59
8.2.1.	Lithologie	59
8.2.2.	Tektonik	83
8.2.3.	Photogeologische Ergebnisse	89
8.3.	Gebiet APOLO	100
8.3.1.	Lithologie	100
8.3.2.	Tektonik	110
8.3.3.	Photogeologische Ergebnisse	113
8.4.	Gebiet RURRENABAQUE	123
8.4.1.	Lithologie	123
8.4.2.	Tektonik	134

8.4.3.	Photogeologische Ergebnisse	137
8.5.	Gegenüberstellung der Kluft- und Entwässerungsnetze der drei Gebiete	147
<u>9.</u>	<u>ZUSAMMENFASSUNG</u>	156
<u>10.</u>	<u>SUMMARY</u>	158
<u>11.</u>	<u>RESUMEN</u>	160
<u>12.</u>	<u>LITERATURVERZEICHNIS</u>	162
12.1.	Literatur zur regionalen Geologie	162
12.2.	Literatur zur Luftbildauswertung	174
<u>13.</u>	<u>ABBILDUNGEN</u>	194
<u>14.</u>	<u>FIGUREN</u>	196
<u>15.</u>	<u>TABELLEN</u>	199
<u>16.</u>	<u>ANLAGEN</u>	202

V O R W O R T

Die vorliegende Arbeit wurde in den Jahren 1972-1973 und 1975-1976 am Institut für Angewandte Geologie, Fachbereich 24 - Geowissenschaften - der Freien Universität Berlin durchgeführt.

Für die Vergabe der Arbeit und ihre Betreuung möchte ich Herrn Prof. Dr. F.K. List herzlich danken.

Für sein stetes Interesse an der Arbeit und für zahlreiche Hinweise und Ratschläge danke ich Herrn Prof. Dr. H.-J. Schneider.

Besonderen Dank schulde ich auch dem Deutschen Akademischen Auslandsdienst (D.A.D.) für die Gewährung eines Auslandsstipendiums für die Dauer eines Jahres, wodurch mir die Durchführung der Geländearbeiten und die Beschaffung des notwendigen Datenmaterials in Bolivien im Zusammenhang mit der Universitätspartnerschaft UMSA La Paz-FU Berlin möglich wurde.

Meinen deutschen und bolivianischen Kollegen möchte ich für manch anregende Diskussion zur Klärung von Problemen meinen Dank aussprechen.

1. EINLEITUNG UND PROBLEMSTELLUNG

1.1. Einleitung

Nur in wenigen Gebieten der Erde findet man extreme Kontraste im Landschaftsbild auf so engem Raum nebeneinander wie in Bolivien. Weite, mit dichtem Dschungel bedeckte Tiefebene bestimmen den Charakter dieses Landes ebenso wie kahle alpine Hochebenen und schneebedeckte Berge. Während die Bewohner im gebirgigen Westen des Landes in kalten Temperaturzonen leben, herrscht nur wenige hundert Kilometer weiter östlich ein warmes, subtropisches Klima.

Diese besonderen geographischen, geologischen und klimatischen Verhältnisse spiegeln sich in den Luftbildern dieses Landes wider.

Bolivien wird in seinem westlichen Bereich von andinen Hochregionen aufgebaut. Seine nördlichen Teile nehmen Tiefländer mit unterschiedlich entwickeltem Relief ein.

Von W nach E ergibt sich dabei folgende geologisch-morphologische Gliederung (Fig.1):

- 1) Westkordillere (Cordillera Occidental)
- 2) Altiplano
- 3) Ostkordillere (Cordillera Oriental) und Ostbolivianisches Bergland
- 4) Subandine Zone (Yungas)
- 5) Beni- und Gran Chaco- Tiefebene (Llanuras)
- 6) Brasilianischer Schild

Legt man ein Querprofil durch die nördlichen Regionen Boliviens, ergibt sich vom Titicaca-See im W bis zum Rio Beni im E folgende Gliederung:

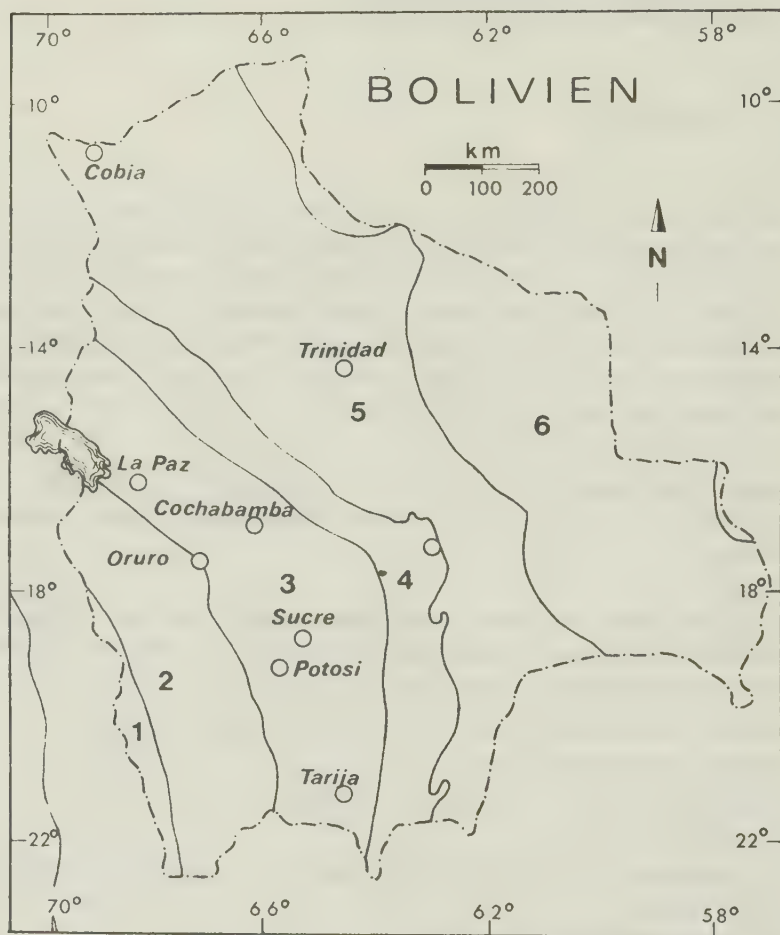


Fig. 1: Die geologisch-morphologische Gliederung Boliviens (nach AHLFELD & SCHNEIDER-SCHERBINA, 1964):

- 1) Westkordillere, 2) Altiplano, 3) Ostkordillere und Ostbolivianisches Bergland, 4) Subandine Zone, 5) Beni- und Chaco-Tiefebene, 6) Brasilianischer Schild.

- 1) Altiplano
- 2) Königskordillere
- 3) Subandine Zone
- 4) Beni-Tiefebene

1.2. Problemstellung

In der vorgelegten photogeologischen Arbeit wird ein Vergleich der wichtigsten, im Luftbild direkt erkennbaren, Faktoren (z.B. Geologie, Morphologie, Vegetation und Klima) durchgeführt. Dieser Vergleich wird anhand von drei verschiedenen Gebieten dargestellt, welche zusammen einen Querschnitt durch den nördlichen Teil Boliviens ergeben.

Dabei wurden, bedingt durch die Auswahl der Luftaufnahmen für eine günstige Auswertung, die schon erwähnten vier geologisch-morphologischen Einheiten in drei Teilgebieten zusammengefaßt:

- 1) Gebiet HUAYNA POTOSÍ (Altiplano/Königskordillere)
- 2) Gebiet APOLO (Subandine Zone)
- 3) Gebiet RURRENABAQUE (Subandine Zone/Beni-Tiefebene)

Daneben geht es in der vorliegenden Arbeit nicht nur um die Darstellung einer stratigraphischen, lithologischen und tektonischen Erkundung geologisch nahezu unbekannter Gebiete Boliviens mit Hilfe der Photointerpretation, sondern auch um die Messung tektonisch-lithologisch-morphologischer Daten (Kluft- und Entwässerungsnetz), ihre statistische Weiterverarbeitung und vergleichende Gewichtung.

1.3. Erforschungsgeschichte

Die ersten geologischen Beschreibungen Boliviens lieferte

D'ORBIGNY im Anschluß an seine Reisen durch Südamerika in den Jahren 1826 - 1832. Seine elf-bändigen Abhandlungen "VOYAGE DANS L'AMERIQUE MERIDIONAL" erschienen 1835 und 1847 in Paris. Die ersten genaueren Bestimmungen paläozoischer Fossilien führten ULRICH (1892), KNOD (1908) und KOSLOWSKI (1914/1924) durch. Mit SMULIKOWSKI publizierte KOSLOWSKI (1934) erste Ergebnisse über Eruptivgesteine der bolivianischen Anden, welche noch heute als grundlegend angesehen werden. Während der Jahre 1926 - 1928 bereiste der Geograph TROLL einen großen Teil Boliviens und befaßte sich hauptsächlich mit Quartärgeologie und Glaziologie, insbesondere in dem Tal von La Paz und der Königskordillere (TROLL, 1927, 1928, 1931, 1935).

Eine geologische Übersichtskarte, zusammen mit einem ersten, ausführlichen Überblick über die Geologie Boliviens, publizierte AHLFELD (1946). 1954 folgte von ihm eine detaillierte Aufzählung von Mineralfundpunkten in Bolivien und 1955 verfaßte er eine eingehende Beschreibung der Mineralvorkommen dieses Landes. 1960 entstand durch AHLFELD & BRANISA eine zweite, überarbeitete Auflage der geologischen Karte Boliviens. Vom Servicio Geologico de Bolivia (GEOBOL) erschien 1968 eine dritte, kommentierte Auflage.

Die geowissenschaftlichen Publikationen Boliviens der Jahre 1960 - 1971 wurden vollständig in der Literaturzusammenstellung von BARTH (1972) erfaßt und brauchen aus diesem Grunde nicht noch einmal erwähnt werden.

Zusammenfassend kann man sagen, daß gerade in letzter Zeit viele lokale, oder eng-regionale Arbeiten auf dem Gebiet der Geologie, Paläontologie und Mineralogie erschienen sind.

2. ARBEITSGRUNDLAGEN

=====

2.1. Luftbilder und Karten

Alle drei Bearbeitungsgebiete, die von verschiedenen Firmen befliegen wurden, sind mit qualitativ guten Luftbildern gedeckt. Die Luftbilder können vom "Instituto Geográfico Militar (IGM)" in La Paz bezogen werden.

Aufgeteilt auf die drei Gebiete stammen die benutzten Bilder aus folgenden Serien:

1.) Gebiet Huayna Potosí

AMS/ 20-5-56/ F-337/ M-165/ Bild Nr. 28339 - 28342

AMS/ 20-5-56/ F-336/ M-165/ Bild-Nr. 28355 - 28359

AMS/ 28-5-56/ F-335/ M-167/ Bild-Nr. 28681 - 28687

AMS/ 27-6-63/ GAP / M-12 / Bild-Nr. 1828 - 1834

AMS/ 10-8-55/ F-334/ M-120/ Bild-Nr. 20479 - 20485

2.) Gebiet Apolo

SMXE/ 6-26-63/ 10-2/ Bild-Nr. 103 - 109

SMXE/ 6-26-63/ 10-2/ Bild-Nr. 82 - 88

SMXE/ 6-26-63/ 10-2/ Bild-Nr. 75 - 81

3.) Gebiet Rurrenabaque

F-18/ R-5073/ Bild-Nr. 119 - 127

F-17/ R-5072/ Bild-Nr. 57 - 65

F-16/ R-5072/ Bild-Nr. 66 - 70

Die jeweils erste Zahlengruppe der Luftbilder in den Gebieten Huayna Potosí und Apolo geben das Aufnahmedatum der Photos an.

Zur Auswertung konnten nur Kontaktkopien auf normalem, nicht

verzugsfreiem Photopapier benutzt werden, was von vornherein einen bestimmten Fehler implizierte.

Alle Luftbilder haben einen Bildmaßstab von 1 : 40 000 bis 1 : 43 000. Die mittlere Kammerbrennweite beträgt 152 mm. Im Durchschnitt liegt die Längsüberdeckung der Luftbilder bei 60%, während bei der seitlichen Überdeckung maximal 45% festgestellt wurden. In jedem Fall handelt es sich um Schwarz-Weiß-Aufnahmen, die ein Format von 23x23 cm besitzen.

Zur Untersuchung und Interpretation lagen drei Blöcke mit je 25, 18 und 20 Modellen vor.

Als Kartenmaterial stand während der Geländearbeit und der Luftbildauswertung zur Verfügung:

- 1) Mapa Geológico de la República de Bolivia - 1 : 2 500 000, La Paz (GEOBOL) 1968.
- 2) Mapa del Departamento de La Paz - 1 : 500 000, La Paz (Pref. del Dept.) 1958.
- 3) Mapa Geológico de La Paz - 1 : 100 000, Hoja Nr. 5944, La Paz (GEOBOL) 1967.
- 4) Mapa Geológico de Milluni - 1 : 100 000, Hoja Nr. 5945, La Paz (GEOBOL), Entwurf.
- 5) Plano Geológico, Sector Noroccidental de la Faja Subandina del Norte - 1 : 50 000, La Paz (GEOBOL), Entwurf.
- 6) Mapa Topográfico La Paz, Norte - 1 : 50 000, Hoja Nr. 5944 I, La Paz (IGM) 1964.
- 7) Mapa Topográfico Pucarani - 1 : 50 000, Hoja Nr. 5944 IV, La Paz (IGM) 1964.
- 8) Mapa Topográfico Milluni - 1 : 50 000, Hoja Nr. 5944 II, La Paz (IGM) 1964.
- 9) Mapa Topográfico Peñas - 1 : 50 000, Hoja Nr. 5944 III, La Paz (IGM) 1964.

Anhand dieser Aufzählung wird klar, daß es neben Übersichtskarten für Bolivien nur im Gebiet Huayna Potosí gute topographische Karten und einen Entwurf zu einer geologischen Karte gibt, auf die der Verfasser aufbauen konnte. Dagegen existieren im Gebiet Apolo keinerlei Karten oder Entwürfe und im Gebiet Rurrenabaque stand nur eine recht unsichere geologische Manuskriptkarte zur Verfügung.

2.2. Instrumente

Folgende Geräte wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit zur photogeologischen Interpretation benutzt:

- 1) TOKO Spiegelstereoskop
- 2) ZEISS Radialsekator RS II
- 3) ZEISS Stereotop
- 4) ZEISS Luftbildumzeichner

Bei der Vorinterpretation der Luftbilder wurde ein Spiegelstereoskop verwendet. Es eignet sich für eine Vor- und/ oder Übersichtsinterpretation besonders gut, da es ein verhältnismäßig großes Gesichtsfeld bietet. Somit können die einzelnen geologischen Informationen noch in einem ausreichenden Zusammenhang gesehen werden.

Durch das weitgehende Fehlen geeigneten Kartenmaterials mußten die zur Einpassung der Luftbilder am Stereotop erforderlichen vier Paßpunkte pro Stereomodell durch eine Radialschlitztriangulation gewonnen werden. Dabei wurde der ZEISS Radialsekator RS II dazu verwendet, die Schablonen für den Triangulationverband zu stanzen (vergl. dazu BURKHARDT et al., 1944; FINSTERWALDER & HOFMANN, 1972).

Das ZEISS Stereotop ist ein Stereo-Kartiergerät 3. Ordnung und dient zur Umwandlung der Zentralperspektive der Luftauf-

nahmen in die Orthogonalprojektion der topographischen Karte, um die gefundenen Interpretationsergebnisse in einer photogeologischen Karte darstellen zu können. Mit Hilfe dieses Gerätes werden alle Daten der photogeologischen Auswertung in das Paßpunktnetz der Radialschlitztriangulation übertragen (s. auch DEKER, 1955).

Der weitaus größte Teil der Auswertung erfolgte direkt am Stereotop. Durch das Fehlen geschlossener Vegetationsbedeckungen in den Gebieten Huayna Potosí und Apolo erwies sich dieses Vorgehen als besonders zeitsparend und vorteilhaft.

Das gesamte Entwässerungsnetz und die topographischen Daten, soweit von Interesse, wurden am Stereotop kartiert. Dagegen wurden tektonische Lineationen oft und geologische Grenzen manchmal am Spiegelstereoskop vorinterpretiert und dann erst am Stereotop nachgezeichnet.

Der ZEISS Luftbildumzeichner ermöglichte durch die gleichzeitige Betrachtung von Luftbild und Karte die nachträgliche Übertragung übersehener und neu gewonnener Daten in die Kartenunterlage und dazu noch die Kontrolle auf Vollständigkeit der übertragenen Daten.

3. ARBEITSMETHODEN =====

3.1. Qualitative Auswertung (Interpretation)

Die qualitative geologische Luftbilddauswertung versucht anhand möglichst verschiedener Merkmale Daten und Hinweise zu erhalten, um den geologischen Aufbau des Bearbeitungsgebietes weitgehend fehlerfrei zu deuten und zu kartieren. Zu den verschiedenen Merkmalen, welche oft in Photoschlüsseln zu Merkmalsgruppen zusammengefaßt werden, rechnet man z.B.:

Topographische Positionen, Morphologie, Oberflächenstruktur, relative Härte, Klüftigkeit, Entwässerungsdichte, Grauton und Vegetation.

Der Verfasser verzichtet an dieser Stelle darauf, auf die verschiedenen Kriterien näher einzugehen, da sie in anderen Arbeiten ausführlich dargestellt wurden (LIST, 1968; POHLMANN, 1971; ROLAND, 1973).

Die günstigsten Bedingungen für eine geologische Photointerpretation ergeben sich in Gebieten, welche frei von Vegetation und Bodenbildung sind, d.h. wo das anstehende Gestein die Geländeoberfläche bildet. Hier ist es möglich, die verschiedenen lithologischen Einheiten direkt zu beobachten und anhand der schon erwähnten Kriterien zu klassifizieren, Andererseits kann man in Gebieten mit dichter, geschlossener Walddecke (z.B. Urwälder) oft nur anhand von Luftbilddaufnahmen geologisch-morphologische Aussagen treffen, da eine Geländebegehung in vielen Fällen nicht möglich ist.

Wichtig für die morphologische Ausbildung eines Gebietes und seiner Vegetation ist auch das Klima (Niederschlag, Temperatur, usw.).

3.2. Quantitative Auswertung (Messung)

Es wurde in dieser Arbeit versucht, neben der qualitativen Erkennung photogeologischer Phänomene und ihrer Zuordnung zueinander auch die quantitative Auswertung eines geomorphologisch-geologisch interessierenden Luftbildinhaltes, d.h. die Messung und anschließende Wichtung der Daten, verstärkt zu behandeln.

Folgende quantitative Auswertungsmethoden wurden verwandt und sollen in diesem Kapitel dargestellt werden:

- 1) Kluftnetz-Messung im Luftbild
- 2) Klüftigkeit und Kluftdichte
- 3) Entwässerungsnetz-Messung im Luftbild
- 4) Entwässerungsdichte
- 5) Korrelation der Richtungsverteilungen von Kluft- und Entwässerungsnetz

3.2.1. Kluftnetz-Messung im Luftbild

Für eine Auswertung mit geologischer Fragestellung sind Anzahl, Länge und Streichrichtung von Photolineation im Luftbild besonders interessant, da sie aufschlußreich in Hinblick auf den tektonischen Beanspruchungsplan einer Region sein können. BLANCHET, 1957; BODECHTEL, 1969; BROWN, 1961; HAMAN, 1961; HENDERSEN, 1960; KUPSCH & WILD, 1968; LATTMANN & SEGOVIA, 1961; LIST, 1968; LIST & STOCK, 1969; METZ, 1967; MOLLARD, 1957; REVNER, 1968; ROLAND, 1973; SCHMIDT-THOMÉ, 1953 und STOCK, 1972 haben sich in ihren Arbeiten mit den Begriffen: Lineament, Lineation, Störung, Kluft usw. in der Photointerpretation eingehend beschäftigt und den Versuch unternommen, sie zu definieren und zu klassifizieren. Deshalb soll an dieser Stelle auf diese Arbeiten verwiesen werden.

Der Begriff Photolineation wird nach ROLAND (1973) als wertungsfreier Oberbegriff für alle im Luftbild erkennbaren "geradlinigen oder schwach gekrümmten Elemente des Landschaftsbildes" (KRONBERG, 1967) angesehen, und zwar ohne eine Gewichtung der Werte nach ihrer Länge oder Art (ROLAND, 1973). Dabei handelt es sich in den meisten Fällen um Klüfte im Sinne von SCHMIDT-THOMÉ (1953) und LIST (1968) und nur in sehr untergeordnetem Maße um Störungen, wobei auch der Verfasser festgestellt hat, daß der Übergang Kluft-Störung fließend ist (s. auch SCHMIDT-THOMÉ, 1953). Im folgenden wird der Begriff

"Kluft" (entsprechend dazu auch die Begriffe "Kluft-Messung, Kluftnetz, Klüftigkeit und Kluftdichte") im Sinne von SCHMIDT-THOMÉ (1953) und LIST (1968) verwendet.

Die Anzahl, Länge und Streichrichtung gegen N (Azimut) der Klüfte wurden nach der am Stereotop erfolgten qualitativen Auswertung aus der photogeologischen Karte entnommen. Dabei wurden diese Parameter mit einem Winkellineal gleichzeitig gemessen und in Gradklassen von 0° - 180° eingetragen. Der Umfang jeder Klasse umfaßt 10° und die Grenzpunkte liegen bei $4^{\circ}/5^{\circ}$, $14^{\circ}/15^{\circ}$ usw. (s. auch ROLAND, 1973). Am Ende der quantitativen Auswertung steht die Darstellung der Kluft in Histogrammen, aufgeteilt in ihre prozentualen Längen und Anzahlen. Nach RENNER (1968) ergeben Kluftanalysen, welche von verschiedenen Bearbeitern erstellt wurden, im wesentlichen ähnliche Werte. Mit dieser Methode haben unter anderem BODECHTEL (1969), HENDERSON (1960), KRONBERG (1964), LIST & STOCK (1969), MARCHESINI et. al (1962) und RENNER (1968) gearbeitet.

3.2.2. Klüftigkeit (K) und Kluftdichte (D_K)

Zur Differenzierung unterschiedlicher Lithofazies bei der Interpretation von Luftaufnahmen werden auch Klüftigkeit und Kluftdichte als gesteinspezifische Parameter verwendet. Nach LIST (1968) stellt der Klüftigkeitsindex K die Anzahl der Klüfte pro Flächeneinheit (1 km^2) dar und gibt dem Bearbeiter somit einen repräsentativen und reproduzierbaren Zahlenwert für die gewünschte Unterscheidung (s. auch BLANCHET, 1957; HENDERSON, 1960; PRESSMANN, 1963; ROLAND, 1973; STOCK, 1972).

Der Parameter K ist von ROLAND (1973) kritisch diskutiert worden: "Die K-Werte sollten daher nur qualitativ, nicht

quantitativ verwertet und beim Vergleich der Werte mehrerer Autoren nur die relativen Änderungen bestimmter Gesteinseinheiten verglichen werden" (ROLAND, 1973: 35).

Im Gegensatz zur Klüftigkeit stellt die Kluftdichte D_K analog zur Entwässerungsdichte D_E die Länge der Klüfte pro Flächeneinheit ($=1 \text{ km}^2$) dar.

Innerhalb der folgenden lithologischen Beschreibung der einzelnen Sedimentgesteinserien werden die Begriffe Klein-, Mittel- und Großklüftigkeit verwendet. Dabei bedeutet Großklüftigkeit, daß die Klüfte überwiegend im 100m-Bereich liegen, während Mittel- und Kleinklüftigkeit eine intensive Zerteilung des Gesteins im m- bzw. cm-Bereich anzeigen.

3.2.3. Entwässerungsnetz-Messungen im Luftbild

Die Interpretation des Entwässerungsnetzes aus dem Luftbild ist sehr zeitraubend ($3/4$ des gesamten Interpretationszeitraumes) und in den Augen des Verfassers nur in den folgenden Fällen sinnvoll:

- 1) bei vergleichenden, statistisch orientierten Fragestellungen, wie z.B. beim Vergleich von Kluft- und Entwässerungsdichte, beim Vergleich von Kluft- und Entwässerungsrichtungen, usw.;
- 2) als Interpretationshilfe zur Unterscheidung unbekannter lithologischer Einheiten;
- 3) bei speziellen hydrologisch-hydrogeologischen Fragestellungen;
- 4) als Orientierungshilfe und/oder Kartierungshilfe in Form einer topographischen Grundlage bei zu ungenauem Kartenmaterial.

In der vorliegenden Arbeit wurde das Entwässerungsnetz auf Grund der vergleichenden, statistisch orientierten Fragestellung in allen drei Gebieten auskartiert. Aufgenommen in die Interpretation wurden Entwässerungssegmente ab 100 m Länge.

Bis auf die gleiche Länge kartierte auch STOCK (1972). Dagegen interpretierten LIST & HELMKE (1970) und ROLAND (1973) auch Entwässerungssegmente von nur 50 m Länge, was jedoch gute Aufschlußverhältnisse voraussetzt.

3.2.4. Entwässerungsdichte D_E

Ähnlich der Kluftdichte D_K ist auch die Entwässerungsdichte D_E zum großen Teil von der lithologischen Ausbildung des Gesteins abhängig. Sie wird daher auch als gesteinspezifischer Parameter bei der geologischen Interpretation verwendet. Aus diesem Grunde wurde die Entwässerungsdichte schon von verschiedenen Autoren zur Unterscheidung und Klassifizierung von Gesteinseinheiten benutzt (GHOSE et al., 1967; KRONBERG, 1967a; LIST & STOCK, 1969; LIST & HELMCKE, 1970; MORISAWA, 1962; RAY, 1960; RAY & FISCHER, 1960; ROLAND, 1973 und SCHUMM, 1956). Nach HORTON (1945) ist die Entwässerungsdichte D (hier als D_E bezeichnet) definiert als die Gesamtlänge L pro Flächeneinheit A . Die Entwässerungsdichte wurde jedoch lange Zeit nur anhand von Entwässerungsbecken ermittelt. Da jedoch kleine Entwässerungsbecken, aufgrund der geringen Anzahl der Talsegmente, nur ungenaue Werte liefern und größere Entwässerungsbecken homogene lithologische Bereiche voraussetzen, schließt sich der Autor dem Vorschlag von RAY & FISCHER (1960) an, zur Ermittlung der Entwässerungsdichte kreisförmige Beprobungsbereiche in Form von vergleichbaren Einheitskreisen (Radius = 1 km) zu verwenden. Nach RAY & FISCHER (1960) ergeben diese Einheitskreise eher konstante Werte für die jeweiligen Gesteinsarten und Gebiete.

Alle im Einheitskreis auftretenden, geradlinig verlaufenden Teilstücke der einzelnen Entwässerungssegmente müssen analog zur Kluftmessung in ihrer Länge und Richtung gegen N eingemessen werden. Um sich dabei zeitraubende Meßarbeiten zu er-

sparen, wurde, speziell für diese Arbeit, von NITSCHKE ein Computer gesteuertes Programm (Tab. 1) in der Programmiersprache ALGOL-60 zur statistischen Auswertung von Entwässerungssystemen aufgestellt. Dabei ist es notwendig, die Koordinaten der Anfangs- und Endpunkte der geradlinig verlaufenden Talsegmente im Einheitskreis dem Computer einzugeben. Man erhält dann die Einteilung der Tal- bzw. Kluftabschnitte in Gradklassen von $0 - 180^{\circ}$, welche jeweils 10° umfassen. Die Grenzpunkte liegen dabei bei $4^{\circ}/5^{\circ}, 14^{\circ}/15^{\circ}, 24^{\circ}/25^{\circ}$ usw. und zwar für die jeweiligen Gesamtlängen, Prozentlängen, Gesamtanzahlen und Prozentzahlen. Hinzu kommen die Werte für die Dichte, mittlere Länge und Gesamtlänge. Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt analog zur Kluftmessung in Form eines Histogramms.

Auf die Vergleichbarkeit von Dichte-Werten verschiedener Bearbeiter geht ROLAND (1973) kritisch ein und kommt zu dem Schluß, daß Dichte-Werte nur unter sehr eng-begrenzten Bedingungen vergleichbar sind. Nur durch eine automatisierte elektronische Auswertung der Luftbilder ist eine Vergleichbarkeit von Dichte-Werten in größerem Umfang gegeben (ROLAND, 1973; SADACCA, 1962 und THEIS, 1962).

In dieser Arbeit wird nicht auf weitere Parameter der Entwässerungsbecken eingegangen, wie z.B. das Bifurkationsverhältnis, die mittlere Länge der Talsegmente, die Talsegmenthäufigkeit und die Ordnung der Talsegmente (s. dazu GHOSE et al. 1967; HORTON, 1945; LIST, 1969; LIST & STOCK, 1969; LIST & HELMCKE, 1970; MELTON, 1958; MORISAWA, 1962; MAXWELL, 1955; SCHUMM, 1956; STRAHLER, 1957 und SHREVE, 1966), da es für die vorliegende Fragestellung nicht als sinnvoll angesehen wurde.

3.2.5. Korrelation der Richtungsverteilung von Kluft- und Entwässerungsnetz

Schon frühzeitig wurde erkannt, daß zwischen den Hauptkluft-

07** TABELLE 1 : STATISTISCHE AUSWERTUNG VON KLUFT- UND ENTWASSERUNGS-
NETZEN. TEIL 1 : EINTAILUNG IN AZIMUTKLASSEN, LÄNGEN,
LÄNGENPROZENTE, ANZAHLEN, ANZAHLPROZENTE, DICHTEN, GESAMT-
LÄNGE UND MITTLERE LÄNGE
(ENTWORFEN IN ALGOL-60 VON B. NITSCHÉ, 1974)

```

#BEGIN#
#INTEGER#KREIS,7.,
INPUT(6),#(N,/,#),7),,
#FOR#KREIS,=1#STEP#1#UNTIL#Z#00#
10** #BEGIN#
#INTEGER#K.,
#INTEGER#N,A1,A2,A3,A4,I,WH.,
#REAL#LG,0.,
#ARRAY#SL,A,PL,PA[1:18],,
INPUT(60,#(2A,N,/,#),K,N),,
OUTPUT(61,#(5/,60R,#(KREIS #),2A,2R,ZZD,5/,#),K,N),,
#BEGIN#
#ARRAY#L,W[1:N],,
LG:=0.,
20** #FOR#I,=1#STEP#1#UNTIL#18#00#
SL[I]:=A[I],:=0.,
#FOR#I,=1#STEP#1#UNTIL#N#00#
#BEGIN#
INPUT(60,#(4(00)#),A2,A1,A4,A3),,
L[I]:=SQRT((A1-A3)2+(A2-A4)2),,
#IF#A4=A2#THEN#W[I],:=90#ELSE#
#BEGIN#
W[I]:=ARCTAN((A3-A1)/(A4-A2)),,
W[I],:=W[I]*45/ARCTAN(1),,
30** #IF#W[I]<5#THEN#W[I],:=180+W[I],,
#END#.,
WH:=ENTIER((W[I]+5)/10),,
SL[WH],:=SL[WH]+L[I],,
A[WH],:=A[WH]+1.,
LG:=LG+L[I],,
#END#.,
INPUT(60,#(N,/,#),,
#END#.,
#FOR#I,=1#STEP#1#UNTIL#18#00#
40** #BEGIN#
PL[I],:=100*SL[I]/LG.,
PA[I],:=100*A[I]/N.,
#END#.,
D:=LG/(4*ARCTAN(1)),,
OUTPUT(61,#(24R,#(10#),33,#(20#),33,#(30#),33,#(40#),33,
#(50#),33,#(60#),33,#(70#),33,#(80#),33,#(90#),33,
#(100#),33,#(110#),33,#(120#),33,#(130#),33,#(140#),33,
#(150#),33,#(160#),33,#(170#),33,#(180#),4/,
#(GESAMTLÄNGE #),10R,18(ZZDRB),?/,
#(PROZLÄNGE #),10R,18(ZDORB),?/,
#(GESAMTANZAHL #),10R,18(ZZDRB),?/,
#(PROZANZAHL #),10R,18(ZDORB),?/,
#(DICHTEN #),ZZD,005R,#(LÄNGE GESAMT = #),ZZD,005R,
#(MITTLERE LÄNGE = #),ZZD,00,*,6R#),SL,PL,A,PA,C/10,LG,LG/N),,
#END#
#END#

```

richtungen und den Richtungen des Entwässerungsnetzes eine mehr oder weniger deutliche Beziehung besteht. Nach den ersten Arbeiten von ENGSTLER, (1913), DINU (1912), LIND (1910), LOTZE (1932), PILLEWIZER (1937), RÖHRER (1916, 1922) und TEICHERT (1932) haben sich in jüngerer Zeit die Autoren ADLER (1957), BERG (1965), LIST (1969), LIST & STOCK (1969) und MURAWSKI (1954, 1964) mit dem Zusammenhang zwischen Kluft- und Gewässernetz befaßt.

Der rein subjektive Vergleich zweier Verteilungen (z.B. Kluftlänge/Kluftanzahl, Kluftazimute/Talsegmentazimute) ist jedoch unzuverlässig und zweifelhaft. Aus diesem Grunde ist es erforderlich, ein statistisches Maß für den Grad der Übereinstimmung in Form eines statistischen Tests heranzuziehen (LIST & STOCK, 1969). Die Figur 2 zeigt ein Flußdiagramm, nach welchem es möglich ist, eine genauere Aussage über die Korrelation zweier Verteilungen zu machen. Dieses Flußdiagramm beruht auf zwei verschiedenen Tests:

- a) SPEARMAN Rang-Korrelations-Test
- b) Chi-Quadrat-Test

Der SPEARMAN Rang-Korrelations-Test, als erster angewendeter Test, prüft, ob zwischen den Verteilungen eine signifikante Korrelation besteht. Der Rang-Korrelationskoeffizient nimmt bei völliger Korrelation den Wert + 1,00 und bei vollständig negativer Korrelation den Wert - 1,00 an. Die Berechnung des Rang-Korrelationskoeffizienten erfolgt nach den üblichen Methoden (MARSAL, 1967; SACHS, 1968). Die von GASSER & WINTER (1961) entwickelte Wertetafel (in SACHS, 1968, 1968:391) wurde zur Überprüfung der Signifikanz der Rang-Korrelation verwandt.

Bei einem Vergleich zweier Verteilungen durch den SPEARMAN Rang-Korrelations-Test wurde als ausreichendes Signifikanzniveau $\alpha = 0,050$ ($R_S = 0,399$) angesehen, was einer Aussagewahrscheinlichkeit von 95% entspricht.

Der Chi-Quadrat-Test prüft darüberhinaus, ob bei einem Zusammenhang zweier Verteilungen eine vollkommene Übereinstimmung

START

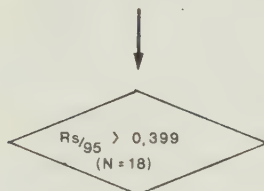
ZEICHENERKLÄRUNG

ERGEBNIS/HANDLUNG

ENTSCHEIDUNG

AUSSPRUNG

PRÜFUNG, OB SIGNIFIKANTE
ABHÄNGIGKEIT BESTEHT :
SPEARMAN - RANG - KORRE-
LATIONS - TEST



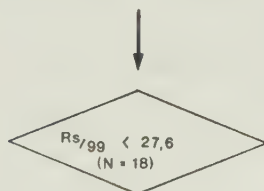
nein

ABHÄNGIGKEIT NICHT
SIGNIFIKANT



ja

PRÜFUNG, OB VOLLKOMME-
NE ÜBEREINSTIMMUNG BE-
STEHT :
CHI - QUADRAT - TEST



nein

ÜBEREINSTIMMUNG
NICHT VOLLKOMMEN



ja

ÜBEREINSTIMMUNG VOLL-
KOMMEN



Fig. 2 Flußdiagramm für einen Vergleich zweier Verteilungen anhand des
SPEARMAN Rang - Korrelations - Test und des Chi - Quadrat - Test

besteht. Der Chi-Quadrat-Test wurde nach dem von MARSAL (1967) beschriebenen Verfahren durchgeführt. Für eine genauere Prüfung vergleicht man den Chi-Quadrat-Wert, der empirisch gefunden wurde, mit dem passenden Chi-Quadrat-Wert aus der Tabelle. Die Nullhypothese der Übereinstimmung ist dann nicht zu widerlegen, wenn der empirische Wert kleiner als 27,6 wird. Liegt der Wert zwischen 27,6 und 33,4, zeigt sich ein wahrscheinlich signifikanter Unterschied und liegt er über 33,4, so differieren die Verteilungen signifikant (MARSAL, 1967).

Bei einem Vergleich zweier Verteilungen durch den Chi-Quadrat-Test wurde als ausreichendes Signifikanzniveau $\alpha = 0,01$ ($\chi^2 = 27,6$) angesehen, was einer Aussagewahrscheinlichkeit von 99% entspricht.

Für die Durchführung des SPEARMAN Rang-Korrelations- und des Chi-Quadrat-Tests wurde ebenfalls speziell für diese Arbeit ein Computer gesteuertes Programm von NITSCHKE in der Programmiersprache ALGOL-60 entworfen (Tab. 2).

Um den Unterschied zwischen einer guten Korrelation (z.B. $R_S = 0,9906$) und einer schlechten Korrelation (z.B. $R_S = 0,1006$) zu verdeutlichen, wurden zwei typische Verteilungen aus dem Devon im Gebiet Apolo graphisch dargestellt (Fig.3).

3.3. Photogeologische Karten

Das bearbeitete Gebiet ist in acht photogeologischen Karten erfaßt (s. Anlage 1-8).

Die photogeologischen Karten "HUAYNA POTOSÍ" liegen im exakten Maßstab 1 : 50 000 vor, da für die Radialschlitztriangulation die jeweilig benötigten 5 Paßpunkte in den Ecken und im Zentrum des Triangulationsverbandes aus den amtlichen topographischen Kartenblättern Milluni, Pucarani, Peñas und La Paz/Norte entnommen werden konnten, die ebenfalls im Maßstab 1 : 50 000 vorliegen.

00** TABELLE 2 : STATISTISCHE AUSWERTUNG VON KLUFT- UND ENTWASSERUNGS-
NETZEN. TEIL 2 : BERECHNUNG DES SPEARMAN PANG-KORRE-
LATIUNKOEFFIZIENTEN UND DER CHI-QUADRATE UEBER DER
LAEENGE UND DER ANZAHL
(GESTELLT IN ALGOL-60 VON R. NITSCHKE, 1974)

```
#BEGIN#
#INTEGER# TITEL, T, K.,
#REAL# SUDEL, RS, CHIQL, CHIQA.,
#ARRAY# PL, PA, DELTA, DELREL, DELREA, DELTAQUAD[1:18].,
10** #OF(60, DATENALLE) .,
    NOCHMAL.,
    SUDEL.=CHIQL.=CHIQA.=0.,
    INPUT(60, #(#H#)#, TITEL) .,
    INARRAY(60, PL) .,
    INARRAY(60, PA) .,
    INELT(60, #(#/#)#) .,
    #FOR# I.=1#STEP#1#UNTIL#18#DO#
    #IF#SIGN(PL[I])#SIGN(PA[I])=1#THEN#GOTO#KEINCHI.,
    #FOR# I.=1#STEP#1#UNTIL#18#DO#
20** #BEGIN#
    DELTA[I].=PL[I]-PA[I] .,
    DELTAQUAD[I].=DELTA[I]*DELTA[I] .,
    SUDEL.=SUDEL+DELTAQUAD[I] .,
    DELREL[I].=DELTAQUAD[I]/(PL[I]+1-SIGN(PL[I])) .,
    CHIQL.=CHIQL+DELREL[I] .,
    DELREA[I].=DELTAQUAD[I]/(PA[I]+1-SIGN(PA[I])) .,
    CHIQA.=CHIQA+DELREA[I] .,
    #END#.,
    RS.=1-SUDEL*.003017647.,
30** OUTPUT(61, #(#503, #(#KREIS #)#, H, 2/, #(#RS = #)#, -0.40, 103,
    #(#CHIQA = #)#, 220.0, 108, #(#CHIQL = #)#, 220.0, 2/,
    #(#DELRELQ = #)#, 18(ZZ0.000), /
    #(#DELREAQ = #)#, 18(ZZ0.000), 7/#)#,
    TITEL, RS, CHIQA, CHIQL, DELREL, DELREA) .,
    #GOTO#NOCHMAL.,
    KEINCHI.,
    #FOR# I.=1#STEP#1#UNTIL#18#DO#
    #BEGIN#
    DELTA[I].=PL[I]-PA[I] .,
40** DELTAQUAD[I].=DELTA[I]*DELTA[I] .,
    SUDEL.=SUDEL+DELTAQUAD[I] .,
    #END#.,
    RS.=1-SUDEL*.003017647.,
    OUTPUT(61, #(#503, #(#KREIS #)#, H, 2/, #(#RS = #)#, -0.40, 10/#)#,
    TITEL, RS) .,
    #GOTO#NOCHMAL.,
    DATENALLE.,
    #END#

50**
```

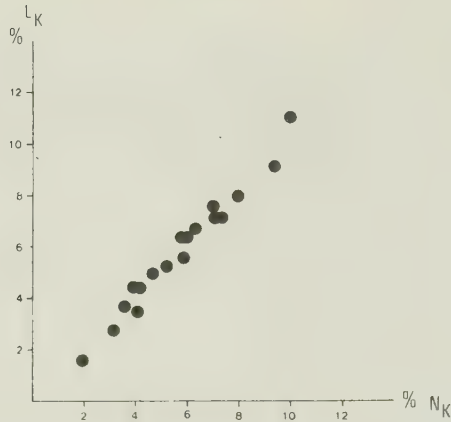
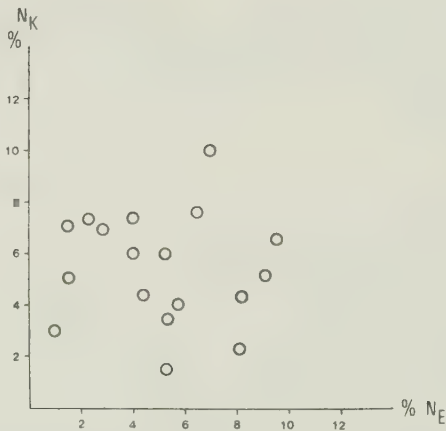


Fig. 3: Beispiel für eine gute Korrelation zwischen zwei Meßreihen.

Die Punkte (L_K , N_K) stellen die Prozente der Längen und Anzahlen der Klüfte in den 18 Gradklassen im ordovizischen Schiefer dar. Sie liegen fast auf einer Geraden und zeigen eine gute Korrelation ($R_s = 0.99$)



Beispiel für eine schlechte Korrelation zwischen zwei Meßreihen.
Die Kreise (N_K , N_E) stellen die Prozente der Längen der Kluft- und Entwässerungsazimute in den 18 Gradklassen im ordovizischen Schiefer dar. Sie bilden eine Punktwolke und zeigen eine schlechte Korrelation ($R_s = 0.10$).
Beide Vergleiche wurden im Gebiet Apolo durchgeführt.

Die photogeologischen Karten "APOLO" dagegen weisen nur einen angenäherten Maßstab 1 : 50 000 auf. Für dieses Gebiet liegen bis heute noch keine topographischen oder geologischen Karten vor. Da die zur Verfügung gestellten Luftbilder einen Maßstab von ungefähr 1 : 40 000 haben sollen, wurde nur eine einfache Radialschlitztriangulation durchgeführt, wobei der gesamte Triangulationsverband um 25% gestaucht und auf einen Wert von ca. 1 : 50 000 gebracht wurde. Aus diesem Grunde kann für diese photogeologischen Karten nur ein angenäherter Maßstab von 1 : 50 000 angegeben werden.

Ähnlich wurde bei der Erstellung der photogeologischen Karten "RURRENABAQUE" verfahren. Hier liegen die Luftbilder im ungefähren Maßstab 1 : 42 000 vor. Aus dem Entwurf "Plano Geologico, Sector Noroccidental de la Faja Subandina del Norte" waren nur unter Schwierigkeiten drei Paßpunkte zu entnehmen, die zudem noch ungünstig verteilt lagen. Diese drei Paßpunkte dienten als Kontrollpunkte für die errechnete Stauchung des gesamten Triangulationsverbandes auf den vorgegebenen Maßstab 1 : 50 000. Daher wird für diese Interpretationskarten auch nur ein angenäherter Maßstab von 1 : 50 000 angegeben, obwohl sie in ihrer Genauigkeit zwischen den photogeologischen Karten "APOLO" und "HUAYNA POTOSÍ" stehen.

Somit fanden drei etwas differierende Arbeitsmethoden bei der Erstellung der Kartenpaßpunktnetze Aufnahme in dieser Arbeit. Die zusätzlich vorhandenen Fehlermöglichkeiten und ihre Größenordnungen wurden eingehend in den Arbeiten von POHLMANN (1971) und ROLAND (1973) diskutiert und brauchen deshalb im Rahmen dieser Arbeit nicht noch einmal besprochen werden.

Ebenso wie in den Arbeiten von POHLMANN (1971) und ROLAND (1973) wurde die photogeologische Kartierung in drei aufeinanderfolgende Arbeitsgänge unterteilt:

- 1) Vorarbeit
- 2) Geländekontrolle
- 3) Auswertung

Da nur ungenügendes oder gar kein Kartenmaterial zur Verfügung stand, mußte dem ersten Arbeitsgang -Vorarbeit- eine besonders große Aufmerksamkeit geschenkt werden. Er beinhaltet die Auswahl der drei Untersuchungsgebiete, wobei neben geologischen, photogeologischen und morphologischen auch ökonomische und verkehrstechnische Aspekte berücksichtigt wurden. Dann folgte die sorgsame Auswahl und Prüfung der Luftbilder auf ihre Aussagekraft, wobei eine erste Übersichtsinterpretation mittels eines Spiegelstereoskops durchgeführt wurde. Dabei erwies sich die vielschichtige Differenziertheit der drei Bearbeitungsgebiete als erschwerender Faktor bei der Vorinterpretation.

In der zweiten Phase -Geländekontrolle- wurde auf Querprofile besonderer Wert gelegt, womit in den Gebieten Apolo und Rurrenabaque fast alle aufgetretenen Fragen der Vorinterpretation gelöst werden konnten. Nur im Gebiet Huayna Potosí mußten die in den Vorarbeiten als unsichere Interpretation markierten Bereiche verstärkt bearbeitet werden.

Die anschließende dritte Arbeitsphase -Auswertung- umfaßt neben der Schlitztriangulation die Interpretation der Luftbilder an einem Stereokartiergerät, alle zur Anfertigung der Luftbildkarten erforderlichen Arbeiten und die qualitative, statistische Auswertung der im Luftbild und im Gelände gewonnenen Daten, ihre Wichtung und ihre Darstellung in Histogrammen, sowie die Deutung der gewonnenen Ergebnisse.

4. LAGE UND GRÖSSE DER ARBEITSGEBIETE

=====

4.1. Allgemeiner Überblick

Die drei Bearbeitungsgebiete befinden sich im N Boliviens in den Departamenten LA PAZ und BENI (Fig. 4). Sie wurden nach geologisch-geomorphologischen Gesichtspunkten hin ausgewählt und umfassen im Durchschnitt je 400 km².

4.2. Gebiet HUAYNA POTOSÍ

Im N Boliviens erhebt sich die Königskordillere hoch über die Altiplanoebene. Einer ihrer höchsten Gipfel, der Cerro Huayna Potosí (6 088 m NN), bildet den Kern des Untersuchungsgebietes und ist gleichzeitig namensgebend für dieses Gebiet.

Das bearbeitete Gebiet liegt etwa 25 km von der Stadt La Paz entfernt in den Provinzen LOS ANDES und MURILLO des Departaments LA PAZ und umfaßt ca. 450 km². Die N-Grenze liegt bei 16° 10', die S-Grenze bei 16° 27' südlicher Breite, während seine westlichen und östlichen Kartenränder ungefähr bei 68° 07' bzw. 68° 23' westlicher Länge verlaufen. Die maximale Ausdehnung des Gebietes beträgt 35 km senkrecht zum Streichen des Gebirges (NE-SW) und 17 km im Streichen des Gebirges (NW-SE).

4.3. Gebiet APOLO

Das Gebiet Apolo wurde benannt nach dem größten Ort, der in dieser Gegend liegt. Dieser Ort befindet sich auf der geographischen Breite S 14° 43' und der geographischen Länge

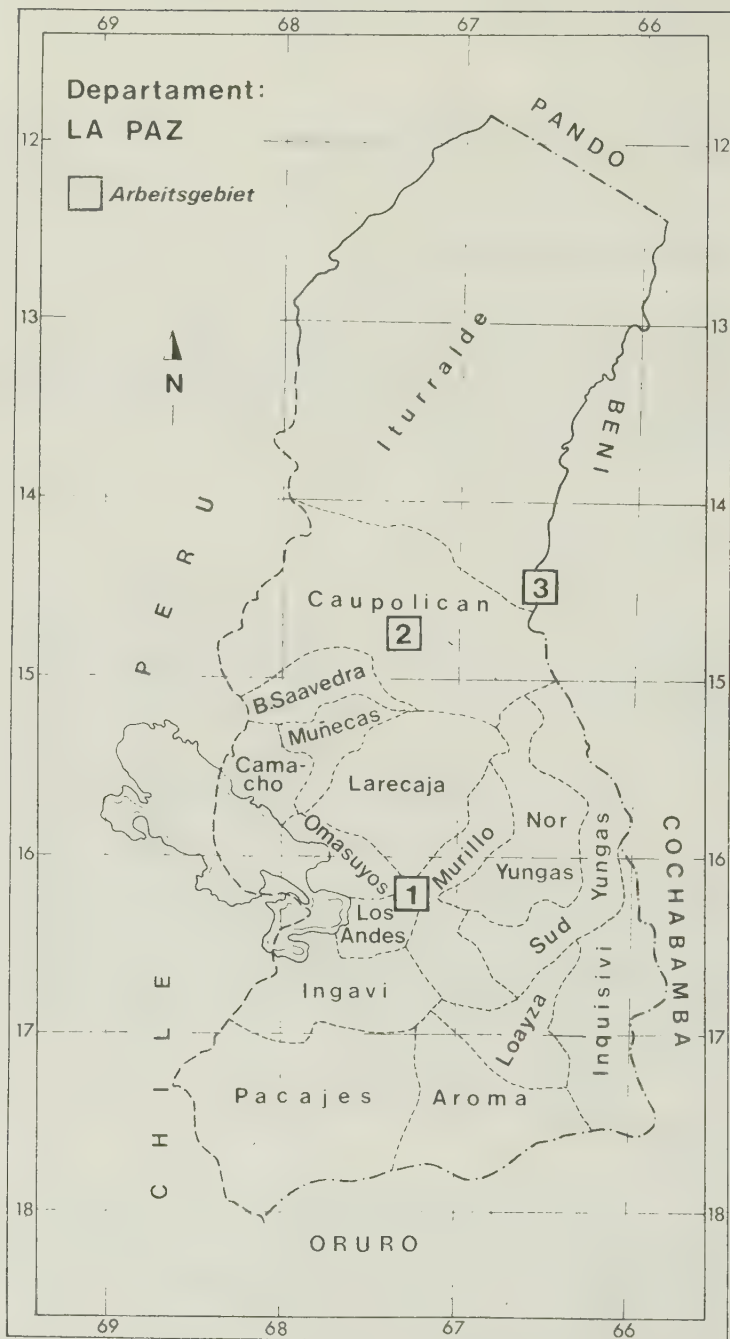


Fig. 4: Übersicht über die Lage und Größe der Arbeitsgebiete in den Departamenten LA PAZ und BENI, Bolivien:
1) HUAYNA POTOSÍ, 2) APOITO, 3) RURRENABAQUE.

W $68^{\circ} 30'$. Die Gesamtfläche des Gebietes umfaßt ca. 360 km^2 , wobei seine Grenzen zwischen den südlichen Breiten $14^{\circ} 40'$ und $14^{\circ} 55'$ und den westlichen Längen $68^{\circ} 32'$ und $68^{\circ} 20'$ liegen. Ihre größte Ausdehnung weist diese Region in der Richtung N-S mit 19 km und in der Richtung E-W mit 22 km auf. Das Tal von Apolo als beherrschendes Element in diesem Gebiet verläuft WNW-ESE, hat eine Länge von 18 km und liegt ca. 1 400 m über NN. Das Gebiet Apolo liegt in der Provinz CAUPOLICÁN des Departaments LA PAZ.

4.4. Gebiet RURRENABAQUE

Auch das Gebiet Rurrenabaque wurde nach dem größten Ort in dieser Gegend benannt. Das Bearbeitungsgebiet erstreckt sich über die Provinzen CAUPOLICÁN und BALLIVIAN der Departamente LA PAZ und BENI und umfaßt eine Fläche von ca. 400 km^2 .

Seine Grenzen liegen bei $14^{\circ} 25'$ bzw. $14^{\circ} 44'$ südlicher Breite und $67^{\circ} 07'$ bzw. $67^{\circ} 35'$ westlicher Länge. Das Gebiet hat seine größte Ausdehnung mit ca. 28 km im Streichen des Vorgebirges (NW-SE), während die größte Ausdehnung senkrecht zu dieser bei ca. 16 km liegt.

Die Höhendifferenz beträgt in diesem Gebiet ca. 400 m. Der Ort Rurrenabaque, als tiefstgelegener Punkt im Bearbeitungsgebiet, weist eine Höhe von ca. 227 m über NN auf.

5. MORPHOLOGIE

=====

5.1. Allgemeiner Überblick

Die drei Arbeitsgebiete unterscheiden sich ganz erheblich in ihrer Morphologie, im Klima und in der Vegetation.

Die morphologischen Ausbildungsformen reichen von der Hochebene des Altiplano über das Hochgebirge der Kordillere, den Tälern des östlichen Andenabfalls (Yungas), bis hin zum Vorgebirge und der Beni-Tiefenebene. Sie weisen damit auf relativ engem Raum eine starke Differenzierung auf.

5.2. Gebiet HUAYNA POTOSÍ

Der Altiplano von Bolivien besteht aus weiten, flachen Ebenen mit abgerundeten glazialen Landformen. Seine durchschnittliche Höhe beträgt etwa 4 000 m über NN. Der größte Teil des Altiplano wurde wesentlich durch die Eiszeiten während des Pleistozäns geprägt, ebenso wie durch rezente Erosion und Akkumulation. Ein typisches Merkmal der Altiplanolandschaft sind weite, flache Ebenen, überzogen mit einer Kette von Seen und Sümpfen (Abb.1). Die nördliche Subregion zeigt eine stärkere Reliefausbildung als der südliche Teil.

Nach TROLL & FINSTERWALDER (1935) setzt unmittelbar am Gebirgsrand eine mächtige Aufschüttung von Moränenmaterial ein, die nach SW abgedacht ist. Die Mächtigkeit der Moränen kann bis zu 340 m nach DOBROVOLNY (1962) betragen. Die Sohlen der Kordillarentäler, die in ihrem Formenschatz mit glazialen Alpentälern übereinstimmen, gehen nach SW in tiefe, trogförmige Täler über, die in leicht gewundenem Verlauf in die Moränenlandschaft scharfrandig einschneiden. Im obersten, tiefsten Teil dieser Trogtäler liegen große Seen, z.B. der Lago Milluni. Sie zeichnen sich durch ihre Schlauchform aus, die dadurch entsteht, daß sie den Boden der Trogtäler in seiner ganzen Breite ausfüllen.

Im Bearbeitungsgebiet sind zwei verschiedene Formengruppen von Moränen zu unterscheiden:

- die Moränen, die die Hochflächen zwischen den Trogtälern in der Abdachung zum Altiplano aufbauen
- die Moränen der Trogtäler

Die sanftgewellten, nach SW zu den großen Ebenen des Titicaca-Beckens abgedachten Hochflächen sind in ihrem kordillerennahen, steileren Teil aus groben Blockmoränen zusammengesetzt. Diese Hochflächen gehen unter Verminderung ihres Oberflächengefälles ohne sichtbar scharfe Grenze in Schotterfelder über und diese wieder nach erfolgter Verflachung und Verfeinerung ihrer Schotter in die versumpften Ebenen auf dem Altiplano, die von Feinsedimenten bedeckt sind (TROLL & FINSTERWALDER, 1935).

In dem Moränenvorland der Altiplanoseite erweisen sich die Hochflächenmoränen als einer älteren Eiszeit angehörig. Hier sind die trogförmigen Täler vom Typ Milluni-Tal nachträglich in die Moränenplateaus eingeschnitten worden. In diese erosiv entstandenen Täler hinein haben sich die Gletscher einer jüngeren Eiszeit gelegt. Ihre Moränen sind überall als scharfe Blockwälle erhalten. An den steilen Talhängen bilden sie scharfgezeichnete Blockterrassen, die sich sehr rasch talabwärts senken und schließlich den Boden der Trogtäler in bogenförmigen Blockwällen queren. Die Hochflächenmoränen haben an keiner Stelle ihre ursprüngliche Wallform erhalten. Sie sind von den frischen Blockwällen der Jungmoränen scharf getrennt. Deshalb wird für die Hochflächenmoränen ein wesentlich höheres Alter und zudem noch eine Periode der Abtragung zwischen den Eiszeiten angenommen, die die Jungmoränen nicht mehr betroffen hat.

Somit erhält man nach TROLL & FINSTERWALDER (1935) vier Stadien der Entwicklung:

- 1.) flächenhafte Vorlandvergletscherung mit mächtiger Aufschüttung von Moränen, deren ursprüngliche Oberflächenform nicht mehr erkennbar ist;
- 2.) Rückgang der Gletscher in das Gebirge und dabei Zertalung des Moränenvorlandes etwa zur heutigen Tiefe;
- 3.) neue Vereisung unter Vorstoßen schmaler Talgletscher in die vorgebildeten Erosionstäler, Ausweitung derselben zu Kastentälern, währenddessen Frostabtragung auf den unvergletscherten Altmoränenplateaus;

- 4.) Rückzug der Talgletscher bis zum heutigen Stand unter Bildung der beschriebenen Rückzugsmoränen.

Im E und NE schließt sich an das Gebiet des Altiplano die Gebirgslandschaft der Königskordillere mit ihren hoch über die Hauptgrundebene des Altiplano hinausragenden, schneebedeckten Gipfeln bis zu einer Höhe von fast 6 500 m an.

In diesen, aus vorwiegend altpaläozoischen, klastischen Sedimentgesteinen aufgebauten Hochgebirgsteil sind vermutlich im Alttertiär saure Magmenkörper intrudiert. Diese Tiefengesteinskörper wurden, mit den sie umgebenden metamorphen Sedimenten, im Jungtertiär in verschiedenen tektonischen Phasen blockartig herausgehoben. Die danach einsetzende Erosion hat die einzelnen Intrusionskörper von ihrer Sedimenthülle freigelegt.

Der Hochgebirgsteil zeigt fast durchweg NW-SE verlaufende Strukturen und ist von einer Anzahl meist N-S verlaufender, glazialer Erosionstäler durchzogen. In diesen Hochtälern finden sich die im Gebirge verbreiteten Akkumulationsformen, wie Bergstürze, Schuttkegel, Moränen u.a. (Abb.2).

Die morphologisch höchsten Punkte im Arbeitsgebiet bilden der Cerro HUAYNA POTOSÍ (6 088m NN), Cerro MARIA LLOCO (5 522m NN), Cerro SALTUNI (5 284m NN) und der Cerro IMILLA APACHETA (5 184m NN).

Das Zongotal mit seiner Fortsetzung im Millunital im E und das Tunital im W des Bearbeitungsgebietes bilden markante Tiefenlinien. Sie sind gleichzeitig die westlichen und östlichen Grenzen des Gebietes. Im N schließt das Liviñosatal das Arbeitsgebiet und im S wird es von der Straße La Paz-Titicacasee begrenzt.

5.3. Gebiet APOLO

Die Region Apolo liegt in der Höhenstufe der "Medio Yungas" von La Paz (MONHEIM, 1965). Es handelt sich hier um ein 150km breites und etwa 1 000 m bis 2 000 m hoch gelegenes Bergland am E-Abhang der Königskordillere, das von den Quellflüssen des Rio Beni in eine Fülle von langgestreckten Bergrücken und z.T. tiefen, z.T. flach eingeschnittenen Tälern gegliedert ist.

Morphologisch wird die Region Apolo durch ein WNW-ESE verlaufendes Tal (Tal von Apolo) gebildet. Das Tal liegt auf einer Höhe von ca. 1 400m NN. Der Talboden zeigt eine leicht gewellte Oberfläche, die durch einanderablösende, flache Hügel gebildet wird.

Im NE wird das Tal von Apolo von der Bergkette des Altuncama begrenzt, die bis zu einer Höhe von 2 000m NN steil über dem Tal aufragt. Im SW begrenzen die nicht viel niedrigeren Hügelketten von Santa Catalina und Atén das Tal. Diese Hügelketten sind stärker zertalt als die Bergkette des Altuncama und zeigen auch nicht die gleiche Schroffheit wie diese. Ihre Höhe reicht bis zu 1 900m NN. An den beiden Talenden im WNW und ESE vereinigen sich die beiden Bergketten wieder (Abb.3).

Der Höhenunterschied zwischen dem Tal von Apolo und den angrenzenden Berg- und Hügelketten dürfte auch z.T. durch die unterschiedliche Verwitterung und Abtragung in den Tonschiefern und Sandsteinen bedingt sein.

Apolo liegt im obersten Einzugsbereich von kleinen Flüssen, die zu dem Flußsystem des Rio Beni gehören. Sie entspringen in den Yungas selbst und haben hier ein ausgeglichenes Relief geschaffen.

5.4. Gebiet RURRENABAQUE

Das Bearbeitungsgebiet Rurrenabaque gliedert sich in zwei morphologische Einheiten:

- a) Vorgebirge
- b) Tiefebene

Das Vorgebirge wird repräsentiert durch die beiden Höhenrücken "Susi" und "Bala", die ein flaches, schüsselartiges Tal umschließen (Abb.4). Die beiden Gebirgszüge erheben sich bis zu einer Höhe von 400 m über dem Talgrund, der bei dem Ort Rurrenabaque eine Höhe von 227m NN aufweist. Das Tal und die beiden Höhenrücken durchquert der "Rio Beni". Während der Fluß im Vorgebirge nur leicht mäandriert, verstärkt sich diese Tendenz in der Tiefebene, wo der Rio Beni neben den stark ausgeprägten Mäanderschlingen tote, z.T. eingesumpfte und mit Vegetation überwucherte Flußarme erkennen läßt (Abb.5).

Das Vorgebirge ist aus Sandsteinen aufgebaut, die schroffe, z.T. steile Wände bilden. Die Grate der Gebirge zeigen Scharten und vor allem im E-Teil der südlicher gelegenen Bala-Antiklinale erkennt man starke Verästelung der Kammlinie. Der morphologische Übergang Vorgebirge-Tiefebene erfolgt relativ abrupt.

Die Tiefebene ist als eine weite, durch keinerlei Erhebung unterbrochene Fläche ausgebildet, die vollständig von tropischem Regenwald bedeckt ist und im E des Bearbeitungsgebietes durch kleinmäandrierende Flüsse entwässert wird.

5.5. Vergleich der drei Gebiete

Bei einem Vergleich der Morphologie der drei Bearbeitungsgebiete fallen etliche Gemeinsamkeiten auf.

In allen drei Gebieten existiert eine Ebene, die von Erhebungen (Berge, Hügel- und Bergketten) begleitet ist. Während jedoch die Ebene im Gebiet Apolo (Tal von Apolo) eine Erosionsfläche darstellt, sind die Ebenen im Gebiet Huayna Potosí (Teil des Altiplano) und im Gebiet Rurrenabaque (Teil der nördlichen Tiefebene) Akkumulationsflächen.

Dabei ist nur die Ebene im Gebiet von Rurrenabaque wirklich plan, während der Altiplano und das Tal von Apolo leicht gewellte Oberflächen aufweisen.

Die Differenz zwischen Talboden und Gipfelhöhe ist im Gebiet Huayna Potosí mit ca. 2 100 m am stärksten ausgeprägt. Im Gebiet Apolo und im Gebiet Rurrenabaque ist diese Differenz erheblich geringer und beträgt nur 600 m bzw. 400 m.

Die beiden letztgenannten Erhebungen werden durch steile, relativ schroffe, tertiäre Sandstein-Bergketten gebildet, während die Erhebungen im Gebiet Huayna Potosí zum Kern der Königskordillere gehören und von Plutoniten und paläozoischen Sedimentgesteinen aufgebaut werden.

6. KLIMA

=====

6.1. Allgemeiner Überblick

Das Klima einer Region hat einen starken Einfluß auf die Morphologie und Vegetation. Da diese beiden Faktoren im Luftbild gut zu erkennen sind und als charakteristische Unterscheidungsmerkmale zur photogeologischen Interpretation mit verwendet werden, ist es notwendig, im Rahmen einer umfassenden photogeologischen Bearbeitung verschiedener Regionen sich auch mit dem Klima dieser Gebiete zu beschäftigen.

Das Klima Boliviens zeigt große Unterschiede (Fig. 5 und Fig. 6). Bolivien verdankt diese ausgeprägten Klimaunterschiede der großen Höhe und Weite der Andenketten, den scharfen Krümmungen der Andenachsen nahe dem Landeszentrum und dem ständigen Wechsel zwischen zwei großen Luftmassen: der warmen, feuchten Luft vom Amazonasbecken und dem starken, nordwärts gerichteten Zug von kälterer und trockenerer Polarluft ("Surazo"). Die letztere fällt periodisch in den südlichen Teil Boliviens ein und zieht am westlichen Teil der Ostanden vorbei in die Bögen der Andenachse. Die feuchten, tropischen Luftmassen bewegen sich ständig gegen die NE Flanken der Anden.

Obwohl die mittlere Jahrestemperatur hoch genug ist, um das Klima als tropisch zu klassifizieren, ist das Tiefland des zentralen und südlichen Bolivien mehr als subtropisch denn als tropisch anzusehen, da die durchschnittliche Tagesfluktuation der Temperaturen hoch ist. Nur das nördliche Drittel des Flachlandes hat ein echt tropisches Klima.

An den Flanken der Anden werden die Temperaturzonen hauptsächlich durch die Höhe bestimmt, während die Feuchtigkeitszonen durch ihre Lage und Richtung in Bezug auf die Amazonasluftmassen bestimmt werden. Am NE-Abfall der Ostanden, wo die meisten Täler nach dem Amazonas hin offen sind, fließt die heiße, feuchte Luft durch die Täler und über die Bergabhänge, erreicht unter Abkühlung seiner Luftmassen die Höhe des Altiplano und bildet eine Zone permanenten Nebels mit einem Maximum an Kondensation. Diese Zone wird durch einen charakteristischen "kalten Wind" gekennzeichnet (s.auch AHLFELD, 1973).

Im bolivianischen Andengebiet ist eine Abfolge von Klimazonen zu erkennen, die von neblig-tropisch, über feucht-subtropisch, warm-humid, humid, kühl-humid, sehr kühl-humid bis kalt-humid reicht.

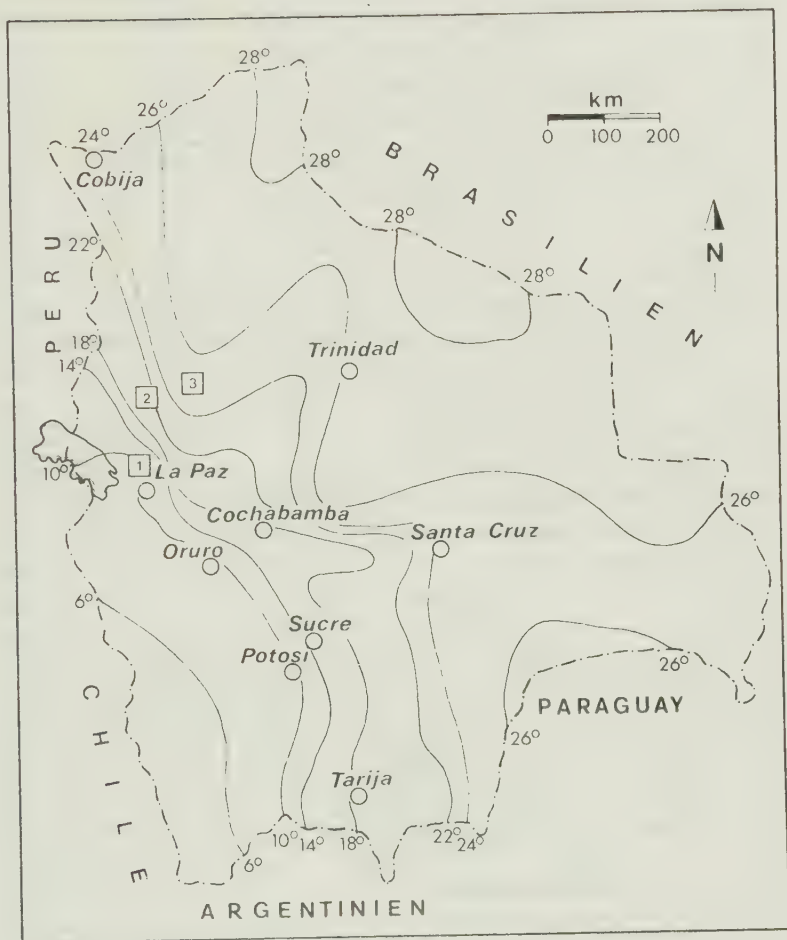


Fig. 5: Jahresdurchschnittstemperaturen in Bolivien von 1963
(mit den drei Bearbeitungsgebieten: 1=Huayna Potosí,
2=Apolo, 3=Kurrenabaque);
Quelle: "Servicio Meteorológico de Bolivia; Anuario
Meteorológico 1963" aus SCHOOP, 1970.

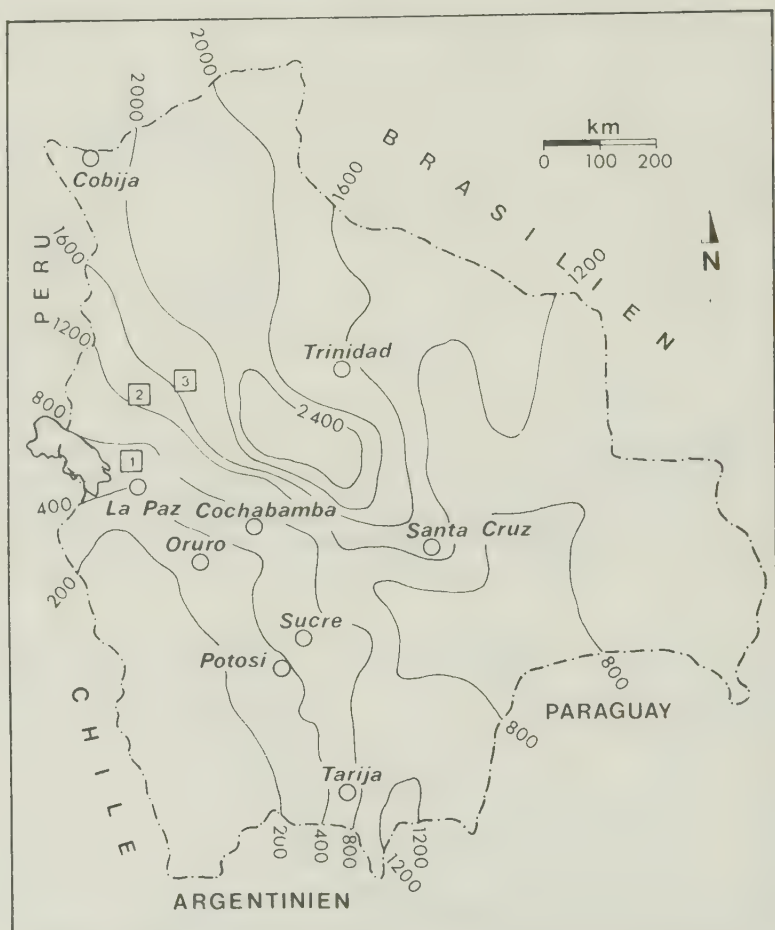


Fig. 6: Jahresdurchschnittsniederschläge in Bolivien von 1946-1960 (mit den drei Bearbeitungsgebieten: 1=Huayna Potosí, 2=Apolo, 3=Rurrenabaque);
Quelle: "Instituto Nacional de Colonización"
aus SCHÖOP, 1970.

In den Andentälern mit ihren einigen tausend Metern Höhenunterschied zwischen Talsohle und den Bergspitzen gibt es einen häufigen Wechsel der Klimazonen. Die Klimazonen sind im allgemeinen stark ineinandergeschoben und eine klimatische Änderung kann sich auf verhältnismäßig kurzem Raum ereignen.

Die Reste der natürlichen Pflanzenbedeckung und Bodenprofile liefern oft einen guten Hinweis auf die Erhaltung des Klimas.

In Bolivien herrschen kalte Klimabedingungen gewöhnlich zwischen 3 500m NN und 4 000m NN. Der gesamte Altiplano und die ihn umgebenden Bergrücken haben kalte bis sehr kalte Tundra-Bedingungen. Die Feuchtigkeitszonen des Altiplano reichen von subhumiden in der Nähe des Titicaca-Sees, über semi-ariden im Zentralgebiet, zu trockenen und wüstenartigen im S. Die umgebenden Bergketten (bis über 6 000m NN) haben sehr kalte, aber verhältnismäßig nasse Bedingungen im NE, sehr kalt und feucht-subhumid im W und sehr kalt-trockene, subhumide bis semi-aride Bedingungen im S und SE. Herrührend vom starken Einfluß des Westwindes und infolge der hohen Verdunstungsrate des Schnees ist die Schneegrenze sehr hoch (oft über 5 500m NN). Das Klima dieses hoch gelegenen Teils Boliviens wird durch die extrem starken, kalten und trockenen Winde bestimmt. Der Frost in dieser Gegend ist streng und tritt gewöhnlich während des ganzen Jahres im südlichen Teil des Altiplano auf. In der Umgebung des Titicaca-Sees ist er jedoch weniger häufig und streng. Die Wolkenhäufigkeit nimmt von S nach N wie auch von W nach E zu.

6.2. Gebiet HUAYNA POTOSÍ

Der nördliche Abschnitt des Altiplano hat, bedingt durch den Einfluß des Titicaca-Sees, der die nördliche Grenze bildet, ein weniger hartes Klima. Es wird am besten mit "trocken-subhumid" bezeichnet.

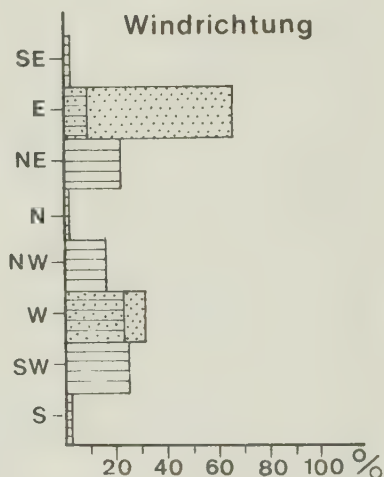
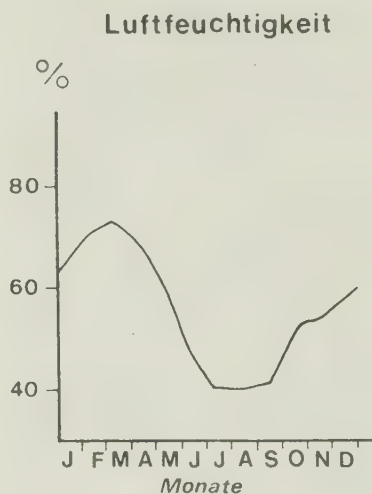
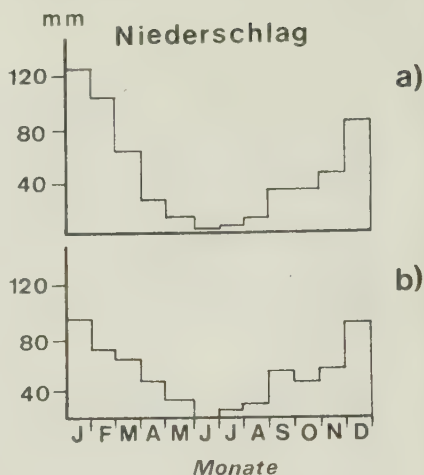
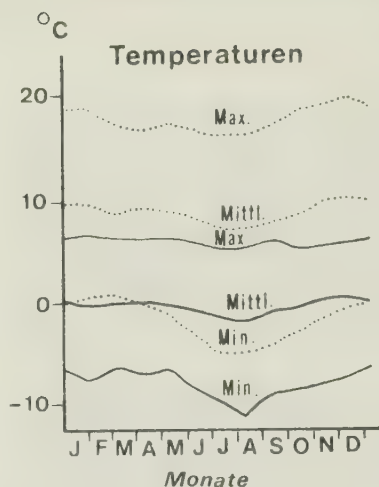


Fig. 7: Maximum-Mittel-Minimum-Temperaturen, gemessen auf den Stationen "El Alto" (1951-1971/gepunktete Linie) und "Chacaltaya" (1955-1965/durchgezogene Linie) im Gebiet Huayna Potosí

Fig. 8: Niederschlagsmenge, a) Station "El Alto" (1951-1971), b) Station "Chacaltaya" (1955-1965) im Gebiet Huayna Potosí

Fig. 9: Relative Luftfeuchtigkeit, gemessen auf der Station "El Alto" (1951-1971) im Gebiet Huayna Potosí

Fig. 10: Windrichtung, gemessen auf den Stationen "El Alto" (1951-1971/gepunktete Felder) und "Chacaltaya" (1955-1965/gestreifte Felder) im Gebiet Huayna Potosí

Da das Gebiet zwei verschiedene morphologische Einheiten aufweist (Altiplano-Königskordillere) und für diese beiden Landschaftstypen auch längere meteorologische Meßreihen existieren, erscheint es angebracht, die Betrachtungen des Klimas nach diesem Gesichtspunkt hin zu unterteilen. Die meteorologischen Daten der Station "El Alto" (4 105m NN, Altiplano) umfassen die Jahre 1951-1971, während die meteorologischen Daten der Station "Chacaltaya" (5 500m NN, Kordillere) die Jahre 1955-1965 repräsentieren.

Die beiden Klimaregionen sind dadurch gekennzeichnet, daß sie nur sehr geringe jährliche Niederschlagsmengen (El Alto = 548 mm / Chacaltaya = 400 mm) aufweisen, wobei auf dem Altiplano die Sommermonate Januar/Februar einen stärkeren Anteil am Niederschlag haben (Fig.8). Die mittleren jährlichen Temperaturen liegen in der Hochkordillere bei $\pm 0^{\circ}\text{C}$ und auf dem Altiplano bei ca. $+ 10^{\circ}\text{C}$ (Fig.7). Die Minimum-Maximum-Temperaturen schwanken in der Kordillere mit $\pm 7^{\circ}\text{C}$ um das Jahresmittel, während auf dem Altiplano die Schwankung $\pm 10^{\circ}\text{C}$ beträgt.

Meßwerte über die Luftfeuchtigkeit liegen nur von der Station "El Alto" vor. Die mittlere jährliche Luftfeuchtigkeit liegt bei 55,3%, wobei die Minimum- und Maximumwerte von 40% bis 72% schwanken (Fig.9). Auch die Richtung des Windes unterscheidet sich in beiden Klimaregionen. Auf dem Altiplano weht der Wind das ganze Jahr über aus E oder W, während er in der Hochkordillere aus den Richtungen NE oder W-SW weht (Fig.10).

6.3. Gebiet APOLO

Der Klimabereich der tieferen Yungas um Apolo zeigt naturgemäß sehr starke Unterschiede gegenüber dem Bereich Altiplano-Kordillere.

Die Meßreihen der Station Apolo, die hier Verwendung finden, umfassen fast den gleichen Zeitraum (1951-1972) wie die meteorologischen Reihen der Station "El Alto" und Chacaltaya".

Das Klima um Apolo ist gekennzeichnet durch die Ausgeglichenheit seiner Temperaturen. Die mittlere Jahrestemperatur liegt bei $+20^{\circ}\text{C}$. Sie schwankt innerhalb eines Jahres um diesen Wert nur um $2-3^{\circ}\text{C}$ (Fig.11). Die Minimum- und Maximumtemperaturen bewegen sich $\pm 8^{\circ}\text{C}$ um den Mittelwert, wobei die Wintermonate Juli/August auch hier ein Minimum in allen drei Temperaturkurven aufweisen.

Der mittlere jährliche Niederschlag in Apolo beträgt 1350 mm. Die Niederschlagextrema für das trockenste und das feuchteste Jahr liegen bei 968 mm und 1650 mm. Auch hier zeigt sich im Monat Juli das Jahresminimum (Fig.12).

Im Durchschnitt fallen 74% der Niederschläge in der Regenzeit (Okt. - Sept.). Der feuchteste Monat ist der Dezember mit 196 mm Niederschlag als langjähriges Mittel, während der Juli der trockenste Monat mit entsprechend 25 mm Niederschlag ist.

Allerdings machen sich Kaltlufteinbrüche ("Surazos") selbst hier noch in abgeschwächter Form bemerkbar. Nach Auskunft der Ortsansässigen führen sie auf der Hochebene von Altuncama (etwa 2000 m) fast alljährlich zur Reifbildung und zu gelegentlichen Schneefällen.

Die mittlere jährliche Luftfeuchtigkeit schwankt, bei einer Abweichung von maximal 5%, um den Wert von 80% (Fig.13).

Die Windrichtung ist einseitig mit der Richtung N festgelegt, wobei allein die S-Richtung noch schwach vertreten ist (Fig.14).

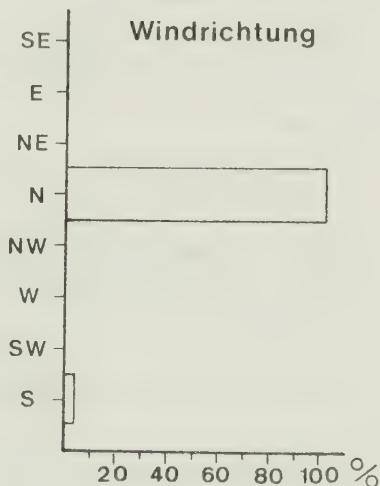
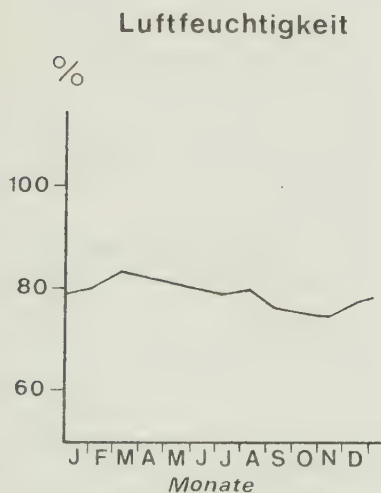
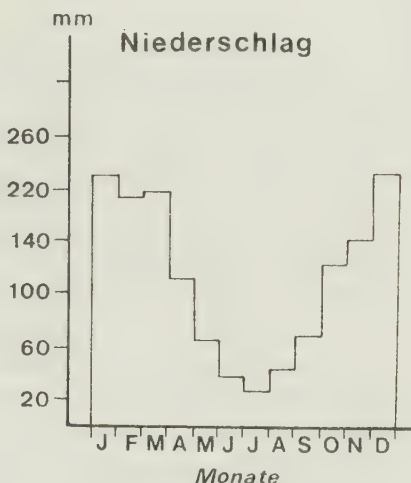
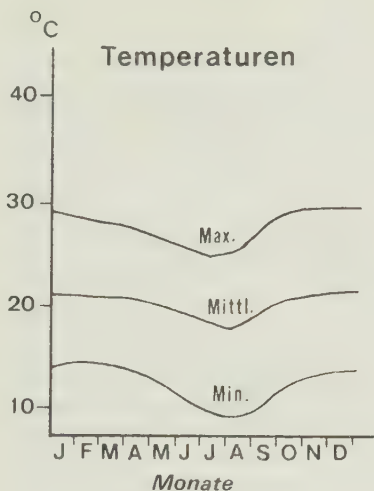


Fig.11: Maximum-Mittel-Minimum-Temperaturen (1951-1972) im Gebiet Apolo

Fig.12: Niederschlagsmenge (1951-1972) im Gebiet Apolo

Fig.13: Relative Luftfeuchtigkeit (1951-1972) im Gebiet Apolo

Fig.14: Windrichtung (1951-1972) im Gebiet Apolo

6.4. Gebiet RURRENABAQUE

Für das Gebiet Rurrenabaque existieren meteorologische Meßreihen schon seit über 20 Jahren (1950-1972). Jedoch wurden diese langjährigen meteorologischen Beobachtungen, ebenso wie in Apolo, nicht im gesamten Gebiet, sondern nur in dem Ort selbst vorgenommen.

Die jährliche mittlere Temperatur liegt bei ca. $+27.5^{\circ}\text{C}$. Auch hier betragen die Schwankungen um diesen Mittelwert, wie in Apolo, nur $\pm 2-3^{\circ}\text{C}$ (Fig.15).

Die Minimum-Maximumtemperaturkurven bewegen sich jeweils 10°C im Durchschnitt über bzw. unter den Mittelwerten, wobei besonders das ausgeprägte Minimum der Minimumtemperaturkurve in den Monaten Juni-August auffällt.

Der jährliche Niederschlag beträgt in diesem Gebiet 1835 mm. Die Extreme schwanken von 1342-2418 mm jährlichen Regenfällen. Niederschlagsmengen sind zu 69% auf die Regen- und zu 31% auf die Trockenzeit verteilt. Der feuchteste Monat ist hier der Februar, am trockensten ist der Monat August (Fig.16).

Die jährliche, mittlere, relative Luftfeuchtigkeit bewegt sich wie in Apolo um einen Wert von 80% (Fig.17).

Die Windrichtung hat ihr Maximum in der Richtung NW. Dazu kommen noch die Richtungen N und SE (Fig.18).

6.5. Vergleich der drei Gebiete

Ebenso wie von anderen Gebieten (Geologie, Vegetation) existieren auch über die meteorologischen Verhältnisse nur relativ wenig Daten. Längere Meßreihen liegen nur von den Stationen "El Alto", "Chacaltaya", "Apolo" und "Rurrenabaque"

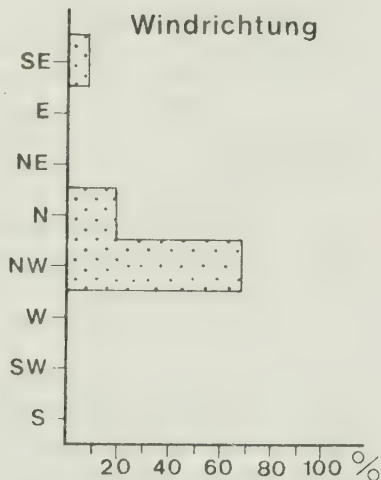
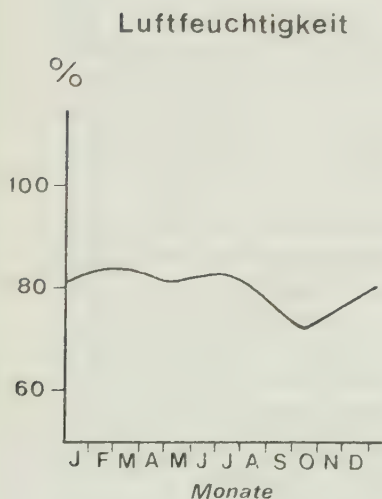
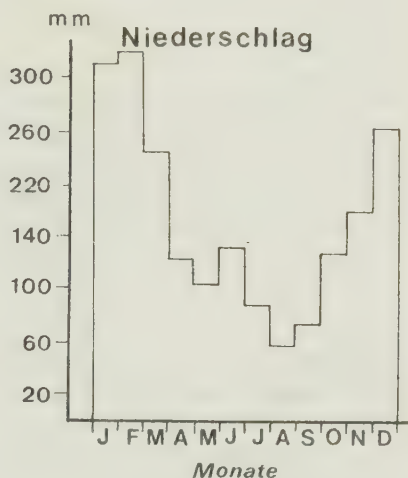
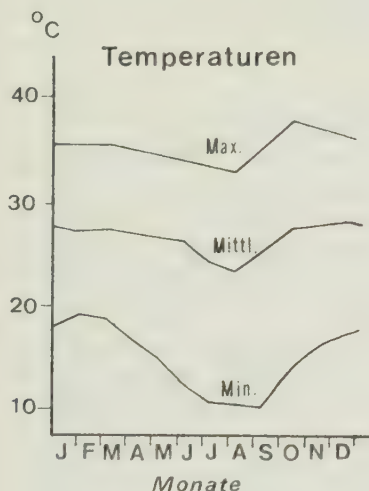


Fig.15: Maximum-Mittel-Minimum-Temperaturen (1950-1972) im Gebiet Rurrenabaque

Fig.16: Niederschlagsmenge (1950-1972) im Gebiet Rurrenabaque

Fig.17: Relative Luftfeuchtigkeit (1950-1972) im Gebiet Rurrenabaque

Fig.18: Windrichtung (1950-1972) im Gebiet Rurrenabaque

vor, wobei die Meßdauer im Durchschnitt einen Zeitraum von 20 Jahren umfaßt. Als Quelle für die meteorologischen Daten diente das "Anuario Meteorológico de Servicio de Bolivia, 1950-1972".

Die Klimabedingungen der drei Arbeitsgebiete zeigen ausgeprägte Unterschiede. Während in den Regionen Altiplano (El Alto) - Kordillere (Chacaltaya) kalte bis sehr kalte, semi-aride/subhumide Tundrabedingungen herrschen, ist das Klima in den Regionen Tieferer Yungas (Apolo) - Tiefebene (Rurrenabaque) tropisch bis subtropisch und subhumid bis humid.

Der Vergleich der vier Klimazonen zeigt in den Mitteltemperaturen (Fig.19) einen sehr ähnlichen Verlauf der Kurven. Der kälteste Monat ist immer der Juli, der wärmste der November. Die Differenz der Mitteltemperaturen in den Gebieten Apolo/Rurrenabaque beträgt 6°C , während sie in den Gebieten Altiplano/Königskordillere bei 8.5°C liegt. Zwischen diesen beiden Klimazonen besteht ein Unterschied in den Mitteltemperaturen von 11.5°C . Den gleichen Verlauf wie die Mitteltemperaturkurven zeigen die Maximum-Minimum-Temperaturkurven, wobei auffällt, daß die Minimum-Temperaturkurve der Gebiete Apolo/Rurrenabaque in den Monaten Mai-September fast identisch ist.

Die gemessenen jährlichen Niederschlagsmengen der Meßstationen El Alto/Chacaltaya liegen absolut gesehen eng beieinander (584/400 mm), während sie sich in den Gebieten Apolo/Rurrenabaque stärker unterscheiden (1350/1835 mm).

Auch der trockenste und feuchteste Monat im Jahr in diesen Gebieten ist nicht so einheitlich festzulegen wie z.B. der kälteste und wärmste Monat. In den Gebieten El Alto/Chacaltaya ist der trockenste Monat der Juni, in Apolo der Juli und in Rurrenabaque der August. Der feuchteste Monat auf dem Altiplano und in der Kordillere ist der Januar, in den Tie-

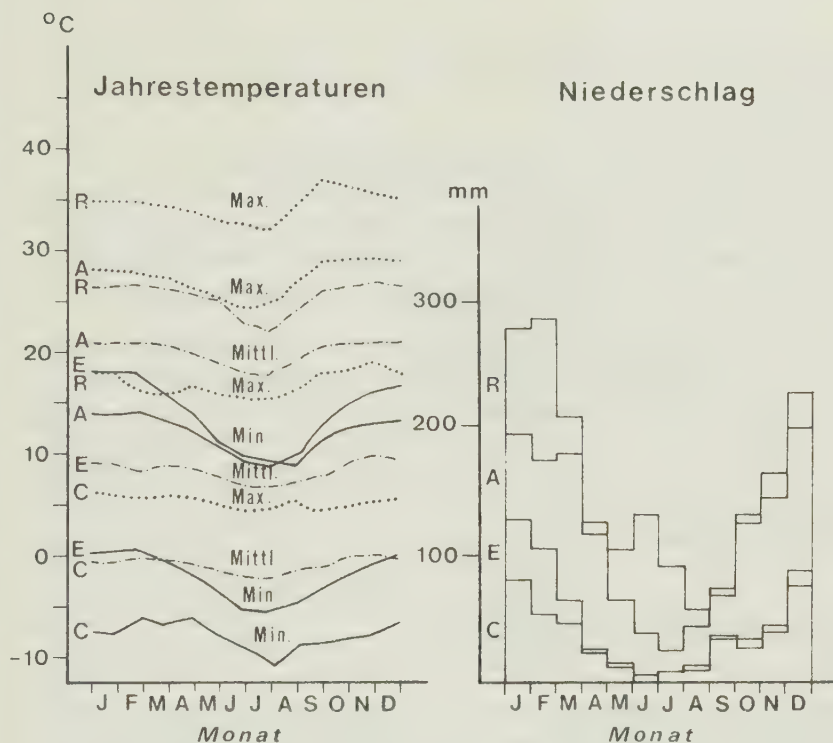


Fig.19: Vergleich der Maximum-Temperaturen (gepunktete Linie), Mittel-Temperaturen (Punkt-Strich-Linie) und Minimum-Temperaturen (durchgezogene Linie)

Fig.20: Vergleich der Niederschlagsmengen

Zeichenerklärung: Altiplano (E)

Königskordillere (C)

Subandine Zone (A)

Beni-Tiefebene (R)

feren Yungas der Dezember und in der Tiefebene der Februar (Fig.20).

Die mittlere relative Luftfeuchtigkeit schwankt in den Gebieten Apolo/Rurrenabaque um den Wert 80% bei fast gleichem Kurvenverlauf, während auf dem Altiplano die mittlere Luftfeuchtigkeit im Verlauf eines Jahres stark zwischen den Werten 70% und 40% schwankt (Fig.21).

Die Figur 22 zeigt einen Vergleich der Windrichtungen der vier Klimaregionen, wobei besonders das Vorherrschen der Richtung N im Gebiet Apolo herausragt.

7. VEGETATION

=====

7.1. Allgemeiner Überblick

Die Verteilung und Art der Vegetation wird vor allem durch klimatische Gegebenheiten (Niederschlagsmenge, Durchschnittstemperatur, etc.) bestimmt. Aus diesem Grund entsprechen die charakteristischen Vegetationszonen den großen Klimazonen dieser Erde.

Innerhalb der einzelnen Vegetationszonen gibt es im regionalen und lokalen Bereich Unterschiede des Bewuchses, z.B. des Vegetationstypes, der Dichte und Anordnung der Vegetation, die durch unterschiedliche Wachstumsbedingungen (Gesteinstyp, Bodentyp, topographische Position, Durchfeuchtung, Exposition zur Sonne, usw.) hervorgerufen werden. Entscheidenden Einfluß auf die Vegetation eines Gebietes haben neben dem Klima die auftretenden Gesteinstypen und die aus ihnen entstandenen Böden.

In diesem Kapitel wird allein auf die relative Unterscheidung der Vegetationstypen und ihrer Verteilung eingegangen. Sie

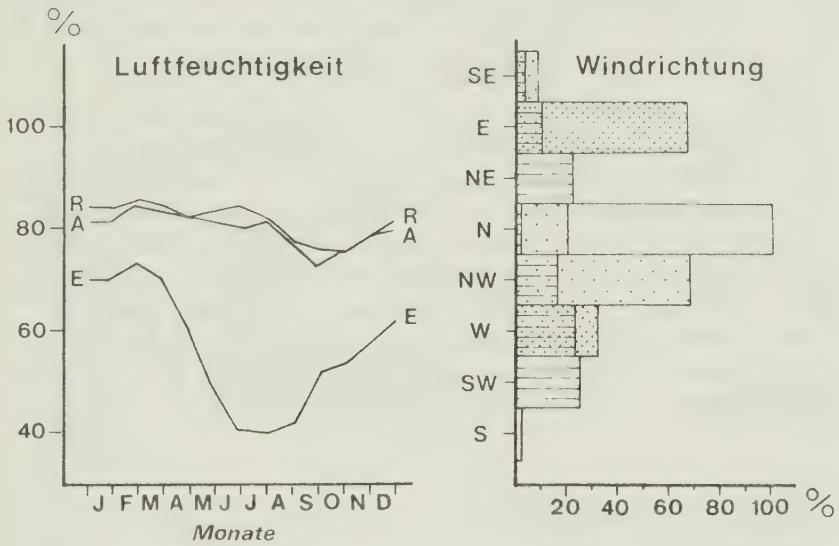


Fig. 21: Vergleich der relativen Luftfeuchtigkeit

Fig. 22: Vergleich der Windrichtungen

Zeichenerklärung: Altiplano (E)(bzw. enggepunktetes Feld)
 Königskordillere (C)(bzw. gestreiftes Feld)
 Subandine Zone (A)(bzw. weißes Feld)
 Beni-Tiefebene (R)(bzw. weitgepunktetes Feld)

machen sich im Luftbild durch Unterschiede im Grauton, in der Form und der Textur bemerkbar.

Betrachtet man die Einteilung der Vegetationsformen in Bolivien (Fig.23), welche von SCHOOP (1970) in Anlehnung an die Arbeiten von TROLL (1931 und 1959) und HUECK (1966) zusammengestellt wurde, so kann man erkennen, daß die drei Bearbeitungsgebiete in zwei Gruppen zu unterteilen sind.

Das Gebiet Huayna Potosí liegt in der Vegetationsregion "Paramo (Paramo = alpine Matten- und Strauchsteppen jenseits der Baumgrenze der Anden) oder feuchte Puna", während die Gebiete Apolo/Rurrenabaque in den "tropischen Regenwäldern des Andenabfalls und der Fußzone" (SCHOOP, 1970) zu finden sind. Dazu muß gesagt werden, daß das Gebiet Rurrenabaque, bedingt durch das gegenüber Apolo leicht veränderte Klima, sehr nahe an der Grenze zur Vegetationsregion "Savannen von Santa Cruz und Trinidad" liegt, was natürlich einen Einfluß auf die Zusammensetzung der Vegetation in diesem Gebiet hat.

7.2. Gebiet HUAYNA POTOSÍ

Charakteristisch für das gesamte Bearbeitungsgebiet ist das Fehlen von Busch- und Baumgewächsen. Die Landschaft des Altiplano und Teile des Hochgebirges sind bedeckt mit dichten Büscheln von Gras, vorwiegend Paja brava (*Stipa ichu*) und Yareta (*Azorella glabra*), welche jedoch keine zusammenhängende Grasdecke bilden, wie sie z.B. oberhalb der Baumgrenze in den Alpen manchmal vorkommt.

In Vertiefungen und seichten Teilen des Gebirges, an Sümpfen und Gletscherseen wird die Flora etwas reichhaltiger. Zu den Gräsern kommen hier noch Moose, Moosflechten, Farne, u.a. Diese an sich recht arme Vegetation ergibt sich aus dem kalten Hochgebirgsklima.

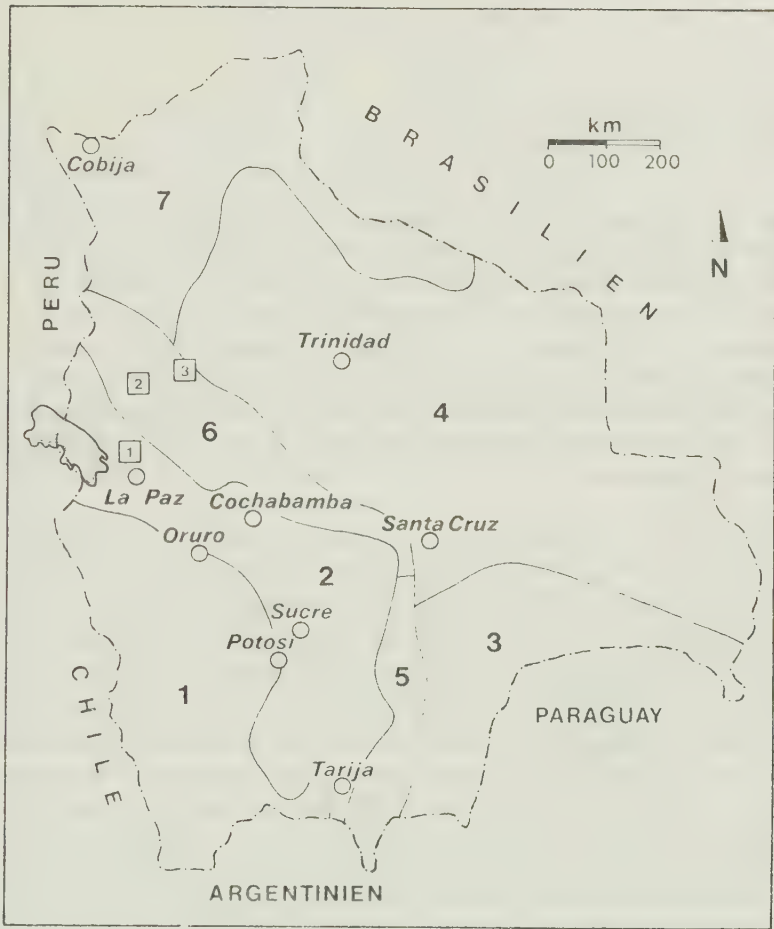


Fig.23: Einteilung der Vegetationsformen in Bolivien(nach SCHÖOP, 1970; in Anlehnung an TROLL, 1931 u. 1959 und HUECK, 1966):
1) Trocken- und Salzpuna, 2) Paramo und Feuchte Puna.
3) Trockenwald des Chaco, 4) Savannen von Santa Cruz und Trinidad, 5) Subtropischer Regenwald des Andenabfalls, 6) Tropische Regenwälder des Andenabfalls und der Fußzone, 7) Tropischer Regenwald des Amazonasbeckens.

(mit den drei Bearbeitungsgebieten: 1=Huayna Potosí, 2=Apolo, 3=Rurrenabaque)

Aufgrund der Busch- und Baumlosigkeit bietet sich in diesem Gebiet eine photogeologische Interpretation an.

7.3. Gebiet APOLO

Das Gebiet Apolo zeigt eine weitgehende Waldlosigkeit. Die Flüsse und Bäche sind zwar begleitet von dichten Galerie- und Schluchtwäldern, doch bilden diese meist nur schmale Säume, während die weiten Flächen und Hänge abseits der Bachkerben von Busch- und Grasland überzogen sind (ELLENBERGER, 1973). Die Galerie- bzw. Schluchtwälder zeigen im Luftbild eine sehr bewegte Kronenoberfläche. Es überwiegen dunkelgraue Töne, die durchsetzt sind mit den helleren Tönen großer Baumkronen.

Das Fehlen von Wäldern ist wahrscheinlich anthropogen im Gegensatz zu der Waldlosigkeit des Hochgebirges, die natürliche Ursachen hat. Die Waldlosigkeit im Gebiet Apolo ist bedingt durch die schon seit langer Zeit betriebene Viehzucht und durch eine fortgesetzte Brandrodung, die die oben beschriebene sekundäre Steppenlandschaft geschaffen hat.

An manchen Stellen läßt sich auch heute noch das Zurückdrängen der Schluchtwälder durch Busch- bzw. Grasbrände beobachten. Allerdings bestand die ursprüngliche Vegetation wahrscheinlich nicht aus tropischen Bergwäldern, sondern aus Baumsavannen. Dafür scheinen insbesondere die gelegentlich an steinigen Hängen in die Weideflächen eingestreuten, knorrigen Bäume mit ausgeprägter, rissiger Borke und meist großblättrigem, lederartigem Laub zu sprechen (MONHEIM, 1965).

Da auch hier nur wenig Wald erhalten ist, ist das Gebiet Apolo ebenfalls für eine photogeologische Interpretation gut geeignet.

7.4. Gebiet RURRENABAQUE

Im Gegensatz zu den Regionen Huayna Potosí (Altiplano/Hochgebirge) und Apolo (Subandine Zone) ist das Gebiet Rurrenabaque fast vollständig von einer geschlossenen Walddecke überzogen. Nach der Einteilung der Vegetationsformen in Bolivien (TROLL, 1931, 1959; BRAUN, 1964; HUECK, 1966; SCHOOP, 1970) und einer Arbeit von BOTELLO (1967) über diese Region liegt Rurrenabaque im Gebiet "der tropischen Regenwälder des Andenabfalls und der Fußzone".

Bei der großen Fülle an Laubholzarten fällt der sehr geringe Anteil an Koniferen auf, die sich wegen der typischen Kronenform in der Regel gut von benachbarten Laubhölzern auf dem Luftbild unterscheiden. Dazu kommt in den tropischen Wäldern der bekannte Stockwerkbau.

Der immergrüne Regenwald zeigt einen dreischichtigen Aufbau. Das oberste Stockwerk, die "emergent trees", das im Tiefland von Baumriesen bis zu 50 m Höhe und mehr gebildet wird, ist fast stets aufgelockert. Im Stereobild hat man den Eindruck einer weiten Wasserfläche mit Wellenbergen und -tälern. Das mittlere Stockwerk bedeckt ziemlich gleichmäßig in etwa 25-30 m Höhe die Waldfläche. Der darunter liegende, dichte Unterwuchs begrenzt die Sicht im Gelände oft auf weniger als 10 m.

Im Luftbild erkennt man fleckige Strukturen, die einen Durchblick auf die unteren Stockwerkbäume zulassen. Die großen Kronen der Einzelbäume erzeugen ein rauhes Bild mit einer großen Vielfalt der Grautöne. Nach ANDREWS (1961) sind dies im Luftbild charakteristische Merkmale von Wäldern der regenreiche Zone.

Die Auflockerung des Amazonasregenwaldes zur feuchten Savanne mit breiten Galeriewäldern beginnt bereits im nördlichen Beni-

Tiefeland. Doch verdichtet sich der fleckenhafte Waldwuchs im nord-westlichen Andenvorland mit Annäherung an das Gebirge erneut zu einer geschlossenen Waldzone.

Nur in der näheren Umgebung des Ortes Rurrenabaque unterbrechen kleine kultivierte Flecken die dichte Decke des Urwaldes. Ähnlich wie diese anthropogenen Flächen sehen die abgestorbenen, baumlosen, jedoch mit einer dichten Busch- und Grasdecke überwachsenen Flußarme aus, welche in der Nähe des Rio Beni liegen.

Für die photogeologische Interpretation eines Gebietes ist eine geschlossene Waldbedeckung weniger günstig. So ist auch bei der Auswertung u.a. der Kluft- und Entwässerungsnetze bei den in diesem Gebiet sehr verschiedenen Gesteinstypen (Sandstein - Schiefer) eine starke Ähnlichkeit der gefundenen Werte zu erkennen (s. Kap.8.4.3.). Alle kleineren Klüfte und "finger tip channels" werden durch die geschlossene Walddecke verdeckt und können so nicht mehr in der Auswertung erfaßt werden. Dadurch ergeben sich bei verschiedener Ausbildung der Gesteine ähnliche Werte, welche zu falschen Ergebnissen führen können.

Auch die geologische Feldarbeit wird durch die geschlossene, weitgehend undurchdringliche Waldbedeckung sehr erschwert oder unmöglich gemacht.

7.5. Vergleich der drei Gebiete

Der Vergleich der Vegetation in den drei Bearbeitungsgebieten läßt eine Zuordnung der Gebiete in zwei Gruppen zu:

- 1.) weitgehende bis völlige Baumlosigkeit
(Gebiet Huayna Potosí/Gebiet Apolo)
- 2.) dichte, geschlossene Waldbedeckung
(Gebiet Rurrenabaque)

Gerade an dieser Zweiteilung läßt sich die Abhängigkeit zwischen der im Gebiet herrschenden Vegetationsform und der photogeologischen Interpretation, bzw. der Messung statistische Daten aus dem Luftbild demonstrieren. Denn die dichte, geschlossene Waldbedeckung im Gebiet Rurrenabaque vereinheitlicht im hohen Maße die verschiedenen, charakteristischen Parameter, die aus dem Luftbild entnommen werden können (Klüftigkeitsindex, Entwässerungsdichte, mittlere Länge der Klüfte, u.s.w.), während im Gegensatz dazu die Gebiete Huayna Potosí/Apolo durch ihre weitgehende Baumlosigkeit eine hohe Genauigkeit der photogeologischen Parameter erwarten lassen.

8. GEOLOGIE

=====

8.1. Allgemeiner Überblick

Im folgenden sollen die vier geologisch-morphologischen Einheiten im N Boliviens kurz vorgestellt werden.

1.) Altiplano

Die im Arbeitsgebiet rund 4000 m hoch gelegene, innerandine, abflußlose Depression des Altiplano wird im W und E von Störungen gegen die West- bzw. Ostkordillere begrenzt. Über vermutetem Präkambrium liegen gefaltete, marine, paläozoische Schichten, deren Mächtigkeit und Alter bisher kaum bekannt sind. Nach einer zwischen Oberdevon und Perm angenommenen tektonischen Phase kam es während des jüngeren Paläozoikums und älteren Mesozoikums in Teilbecken des Altiplano zu Evaporit-Ausscheidungen. Etwa ab mittlerem Tertiär begann mit der Hebung der West- und Ostkordillere die grabenartige Absenkung des Altiplano. In der bis in das Jungtertiär andauernden Absenkung wurde der Altiplano-Graben von der östlichen

und westlichen Kordillere her vorwiegend mit klastischen Sedimenten zugeschüttet. Dabei häufte sich eine kontinentale Schichtfolge von vermutlich mehr als 10.000 m Mächtigkeit an. Während der Haupthebensphase im Jungtertiär (Pliozän nach AHLFELD, 1970) wurde der Altiplano von einer Bruchtektonik erfaßt. Ab Ende des Tertiärs fielen die morphologisch höheren Bereiche des Altiplano durch vorwiegend glaziale und fluviatile Vorgänge der Erosion anheim. Neben der Erosion prägten vor allem Akkumulationsvorgänge im Quartär die heutige morphologische Ausbildung des Altiplano.

2.) Königskordillere

Die Königskordillere (Höhenlagen zwischen 2500 m und 6500 m) wird aus gefalteten, altpaläozoischen, klastischen Sedimentiten (Schiefer, Sandsteine, Quarzite) aufgebaut. In diese vorwiegend ordovizisch-silurischen Gesteine sind vermutlich während des Mesozoikums und Tertiärs saure Magmenkörper intrudiert (Abb.6). Diese Tiefengesteinskörper wurden mit den sie umgebenden schwach metamorphen Sedimentiten im Jungtertiär in verschiedenen tektonischen Phasen blockartig herausgehoben. Die danach einsetzende Erosion hat einzelne Intrusionskörper von ihrer Sedimenthülle freigelegt. Im allgemeinen sind die granitischen bis granodioritischen Intrusiva im N des Gebirges am höchsten herausgehoben.

3.) Subandine Zone mit Ostandinen Randketten

Die Subandine Zone mit ihren Ostandinen Randketten nimmt eine Höhenlage zwischen 1000 - 2500 m NN ein. Die Schichtfolge besteht überwiegend aus marinen, paläozoischen, klastischen Sedimentgesteinen mit kontinentalen, mesozoischen und tertiären Überlagerungen. Es handelt sich im wesentlichen um Schiefer, Sandsteine, Quarzite, Konglomerate, Mergel und Kalke. Weitverbreitet sind tertiäre und quartäre Becken-, Terrassen- und Flußablagerungen.

4.) Beni-Tiefebene

Zwischen der Subandinen Zone im W und dem Brasilianischen Schild im E liegt die Beni-Tiefebene. Im Bereich östlich des

Rio Beni überlagern mächtige junge Aufschüttungen die präkambrischen Gesteine des Brasilianischen Schildes bzw. liegen diese quartären Ablagerungen über paläozoischen und mesozoischen Sedimentgesteinen.

8.2. Gebiet HUAYNA POTOSÍ

8.2.1. Lithologie

In der Königskordillere herrscht konkordanter Schichtverband vom Ordoviz bis ins Devon, während vom Devon bis ins Quartär die Ablagerungen diskordant aufeinander folgen.

Die Schichtfolge im Arbeitsgebiet umfaßt dabei folgende Einheiten (Fig.24):

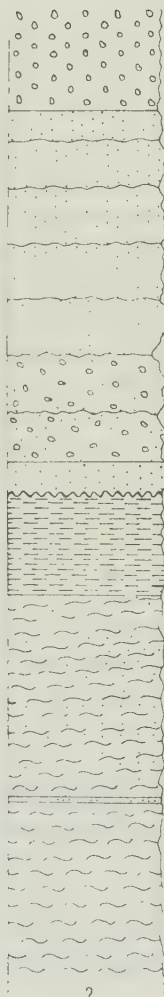
- h) Lockersedimente (Quartär)
- g) Granit
- f) Sandstein (Tertiär)
- e) Sandstein (Kreide)
- d) Feinsandstein (Devon)
- c) Schiefer (Silur)
- b) Feinsandstein (Oberstes Ordoviz)
- a) Schiefer (Ordoviz)

In den letzten drei Jahrzehnten haben sich verschiedene Autoren mit der stratigraphisch-paläontologischen Entwicklung des andinen Raumes Boliviens befaßt. Neben anderen sind zusammenfassende Arbeiten zu nennen von:

AHLFELD (1926, 1946, 1953, 1957, 1962a, 1962b, 1967, 1972),
AHLFELD & BRANISA (1960), AHLFELD & MOSEBACH (1935), ARCE &
MONTES DE OCA (1965), BARTHEL & BARTH (1972), BISCHOFF (1963),
BRANISA (1969), DÁVILA & RODRIGUEZ (1967), DÁVILA & PONCE DE
LEON (1971), DOBROVOLNY (1962, 1969), EVERNDEN, KRIZ & CHERRO-
NI (1966), FRICKE (1964), FRICKE & VOGES (1968), GEOBOL (1968),

Sedimentfolge im Gebiet

HUAYNA POTOSI



QUARTÄR

(Lockermaterial)

TERTIÄR

(Sandstein/Konglomerat)

KREIDE

(Sandstein)

DEVON

(Schiefer)

SILUR

(Schiefer)

OBERSTES ORDOVIZ

(Feinsandstein)

ORDOVIZ

(Schiefer)

Fig. 24

HARRINGTON (1962), GERTH (1960), KOSLOWSKI (1923), LJUNGGREN (1961, 1962), MARTINEZ, SUAREZ & SUBIETA (1971), MEYER & MURILLO (1961), MOON (1939), NEWEIL (1949), PUTZER (1968), RADELLI (1964, 1966), RIVAS (1968), SCHLAGINWEIT (1943), SCHLATTER & NEDERLOF (1966), SCHNEIDER-SCHERBINA (1962, 1963), SIRVAS & TORRES (1966), TROLL (1927/28, 1928, 1931), TROLL & FINSTERWALDER (1935), VISTELIUS & FULLER (1969), WOLFART & VOGES (1968) u.a.

8.2.1.a) Schiefer (Ordoviz)

Die Sedimentite des Ordoviz bilden im gesamten Bearbeitungsgebiet das älteste bekannte Schichtglied. Sie sind im N des Cerro Huayna Potosí in großen Mächtigkeiten und im S desselben in geringeren Vorkommen anzutreffen (Abb.7).

Die ordovizischen Ablagerungen sind nur im S Boliviens eingehender bearbeitet worden (RIVAS et al., 1969; RIVAS, 1971). Dagegen existieren keine genaueren Angaben über diese stratigraphische Einheit im nördlichen Bolivien.

Die ordovizischen Schichten bestehen aus monotonen marinen Sedimentiten und werden zumeist aus unregelmäßig gebänderten Tonschiefern mit eingeschalteten Sandsteinlagen und -linsen sowie Quarziten aufgebaut.

Die Schiefer zeigen im verwitterten Zustand eine dunkelgraue, im Anschlag eine mittelgraue Farbe. Die Quarzite haben eine rötlich-graue Farbe. Sie sind kompakt und weisen eine feine bis sehr feine Körnung mit subgerundeten Quarzkörnern auf.

Die Bankmächtigkeit schwankt zwischen 3 cm und 20 cm. Der Bruch der Handstücke ist scharf- bis rundkantig. Durch Farbwechsel ist in den Schiefern, aber auch in den Sandsteineinschaltungen und den Quarziten eine Schichtung gut zu erkennen. Z.T. überziehen Fe-Oxyde die ordovizischen Schichten.

Die Gesteine sind fast durchweg leicht metamorph. Die Metamorphose verstärkt sich, je näher man zum Kontakt mit dem Granit des Huayna Potosí gelangt (MIRANDA, 1971). Da der Granitkontakt jedoch eine tektonische Überschiebungsfläche darstellt, wäre es auch denkbar, daß der höhere Metamorphosegrad des Ordoviz lediglich auf die stratigraphisch tiefere Position zurückzuführen ist. Die ordovizischen Sedimentite sind oft von gelben oder ockerfarbenen Flechten überzogen.

Im Dünnschliff erkennt man umkristallisierte Tonminerale, Biotite, Chlorite, Serizite und Quarze mit fleckigen Neubildungen von glimmerigen Substanzen. Limonit belegte Schieferungsflächen zeichnen ein deutliches Deformationsgefüge nach (Abb.8).

Die im Bearbeitungsgebiet vorliegenden ordovizischen Serien sind fossilarm. BULLMAN (1931) hat als erster Bearbeiter wenige Fossilien beschrieben.

Die Sedimente wurden wahrscheinlich im küstennahen Bereich eines Meeres ruhig abgelagert.

Die Klüftung ist als ausgeprägte Mittel- bis Großklüftung ausgebildet. Die Verwitterung erfolgt zu Blöcken oder kleineren Bruchstücken.

Die ordovizischen Sedimentgesteine sind flach bis überkippt gelagert und fallen zumeist nach SSW bzw. NNE ein.

Die aufgeschlossene Mächtigkeit der ordovizischen Serien beträgt im Bearbeitungsgebiet ca. 1700 m.

Im Luftbild lassen sich die ordovizischen Sedimentite anhand verschiedener charakteristischer Unterscheidungsmerkmale von den anderen geologischen Einheiten im Bearbeitungsgebiet trennen:

- 1.) lithologische Ausbildung: Schiefer
- 2.) Homogenität : einheitlich
- 3.) Oberflächenstruktur : rau, bröckelig
- 4.) relative Härte : hart
- 5.) Grauwert : 4 - 7
- 6.) Klüftung : Mittel- bis Großklüfte
- 7.) Klüftigkeit (K) : $15,2 \text{ km}^{-2}$
- 8.) Kluftdichte (D_K) : $8,2 \text{ km}^{-1}$
- 9.) Entwässerungsform : subparallel bis subdendritisch
- 10.) Entwässerungsdichte (D_E): $6,24 \text{ km}^{-1}$

Gegenüber den hangenden Sedimentgesteinen der Zapla-Formation sind die ordovizischen Schichten sehr viel härter ausgebildet und ihre Oberflächenstruktur ist rauher und bröckeliger im Luftbild.

Der Grauwert dieser beiden geologischen Einheiten -gemessen auf einer 20-stufigen Grauwertskala- ist dagegen wegen seiner Ähnlichkeit nicht als Unterscheidungsmerkmal anzusehen. Die ebenfalls angrenzenden silurischen Schiefer weisen eine glatte bis schwach rauhe Oberfläche, weiche morphologische Formen, eine sehr viel geringere Klüftigkeit und Kluftdichte und einen geringeren Grauwert auf, was eine Trennung dieser beiden geologischen Einheiten sehr erleichtert.

Die im N des Gebietes die ordovizischen Sedimentite überlagernden granitischen Intrusionsmassen zeigen den gleichen Grauwert, die gleichen steilen, schroffen Felswände und eine sehr ähnliche Oberflächenstruktur. Allein die gegenüber dem triassischen Granit längeren, einheitlicher ausgebildeten Klüfte und die geringere Klüftigkeit und Kluftdichte lassen eine Trennung dieser beiden Gesteinstypen im Luftbild zu.

8.2.1.b) Feinsandstein (Oberstes Ordoviz)

Den marinen Serien des Ordoviz folgen im Obersten Ordoviz die ebenfalls marinen Sedimentite der Zapla-Formation, die

konkordant die ordovizischen Schiefer überlagern.

Im folgenden wird der Begriff "Formation" entsprechend dem anglo-amerikanischen Sprachgebrauch verwendet.

Die Zapla-Formation findet man im Bearbeitungsgebiet im S, SW und SE des Cerro Huayna Potosí in geringmächtigen Vorkommen.

Die Zapla-Serie hat als erster Bearbeiter SCHLAGINWEIT(1943) näher untersucht und ihr den Namen gegeben. In letzter Zeit befaßte sich vor allem LOHMANN (1961, 1965 und 1970) mit dieser Formation. In der Literatur ist auch die Bezeichnung "Zapla-Tillit" oder "Cancañiri-Formation" zu finden (TURNEAURE, 1960), jedoch haben sich diese beiden Bezeichnungen nicht durchgesetzt.

Es handelt sich hier um fossilfreie, feinkörnige, massige Sandsteine, die in sich konkordant liegen und dem Obersten Ordoviz zugerechnet werden (FRICKE u.A., 1968).

Die Zapla-Ablagerungen zeigen schwarzgraue Farben im frischen Zustand. Verwittert sehen sie hellgrau, grünlich-grau oder rostbraun aus. In der tonig-feinsandigen Matrix erkennt man subgerundete bis gerundete, grobkörnige Quarzklasten und viele Glimmereinschaltungen. Der Bruch ist splitterig. Eine Schichtung ist im allgemeinen nicht zu erkennen. In den höheren Teilen beobachtet man braunrote Fe-Oxydationsüberzüge. Die an anderen Orten gefundenen, für die Zapla-Serie typischen Pyrit-Kristall-Einschaltungen (COCA, 1972; FRICKE u.A., 1963 und 1964; MIRANDA, 1971), konnten nicht nachgewiesen werden.

Die Verwitterung erzeugt schalig bis bröckelig aussehende Verwitterungsformen. Vereinzelt und unregelmäßig verteilt finden sich im Gestein bis kopfgroße Geschiebe (Granite mit weißem Feldspat, Quarzite, etc.), mit teilweise deutlicher Striemung bzw. Kritzung (Abb.9). Bis vor einigen Jahren wurde diese Striemung bzw. Kritzung als glazial bedingt angenommen,

d.h. daß es sich hierbei um marine Tillite handeln sollte (s.a. LOHMANN, 1964). Erst in letzter Zeit wird von verschiedenen, vor allem bolivianischen Geologen diese Deutung angezweifelt. Da die Mächtigkeit der Zapla-Formation stark schwankt, ist RADELLI (1966) der Meinung, daß die Sedimente dieser Serie durch "turbidity currents" abgelagert wurden.

Im Dünnschliff (Abb.10) erkennt man schlecht klassierte Quarzkörner, die einen heterogenen Rundungsgrad (subangular bis gut gerundet) aufweisen. Die Quarzkörner sind reich an Einschlüssen und löschen undulös aus. Die gut gerundeten Quarzkorngrenzen zeigen schwache Anlösungen. In der Matrix beobachtet man zudem Chlorit-Muskowit-Verwachsungen, praktisch keinen Feldspat und Einschlüsse von mylonitischem Quarz, der stark gefeldert ist und suturierte Korngrenzen aufweist. Die sedimentäre Schichtung der Ton-Glimmer-Matrix ist von einer Schieferung steilwinkelig geschnitten und zwischen den Schieferungsbahnen verfälscht worden.

Die Sedimentite der Zapla-Formation sind steil nach SSW einfallend bzw. steil nach NNE überkippt gelagert.

Das Gestein zeigt eine z.T. gut ausgebildete Klüftung, wobei sich die Klüfte im m- bis 100m-Bereich bewegen. Die Klüfte sind z.T. mit sekundärem Quarz wieder verheilt.

Die aufgeschlossene Mächtigkeit der Zapla-Sedimentite dürfte im Bearbeitungsgebiet ca. 35 m nicht übersteigen.

Die geringmächtigen Vorkommen der Zapla-Sedimente lassen im Luftbild nur einige typische Unterscheidungsmerkmale erkennen:

- | | |
|-------------------------------|--------------------------|
| 1.) lithologische Ausbildung: | Schiefer |
| 2.) Homogenität | : einheitlich |
| 3.) Oberflächenstruktur | : glatt bis schwach rauh |
| 4.) relative Härte | : relativ weich |
| 5.) Grauwert | : 3 - 7 |
| 6.) Klüftung | : nicht zu erkennen |
| 7.) Kluftdichte (K) | : " " " |

- | | | |
|------------------------------------|---|-------------------|
| 8.) Kluftdichte (D_K) | : | nicht zu erkennen |
| 9.) Entwässerungsform | : | " " " |
| 10.) Entwässerungsdichte (D_E) | : | " " " |

Im Luftbild sind diese Schichten durch ihre geringere Härte und durch ihre glatte bis schwach raue Oberfläche gegenüber den liegenden ordovizischen Schichten zu erkennen. Die hangenden silurischen Schiefer weisen gegenüber den Zapla-Sedimentiten einen sehr viel geringeren Grauwert auf.

Aufgrund der geringmächtigen Vorkommen der Gesteine der Zapla-Formation im Bearbeitungsgebiet waren die Parameter Klüftung, Klüftigkeit, Kluftdichte, Entwässerungsform und Entwässerungsdichte nicht zu ermitteln.

8.2.1.c) Schiefer (Silur)

Die Zapla-Formation wird überlagert von tonig-sandigen Ablagerungen des Silur, die die marine Sedimentation in diesem Gebiet fortsetzen.

Die silurischen Schichten nehmen im mittleren Bereich des Bearbeitungsgebietes einen regional weit verbreiteten Raum ein.

Mit silurischen Ablagerungen haben sich vor allem BRANISA (1965 und 1969), DÁVILA & RODRIGUEZ (1967), FRICKE u.A. (1964), SCHLATTER & NEDERLOF (1966) und WOLFART & VOGES (1968) befaßt.

Nach der biostratigraphischen Gliederung silurischer und devonischer Ablagerungen für das Gebiet Nordbolivien, Departamento La Paz, teilen WOLFART & VOGES (1968) das Silur in zwei Schichtstufen (Llallagua-Pampa) ein, während BRANISA (1969) und andere Geologen in Bolivien das Silur in drei Schichtstufen (Llallagua-Pampa-Catavi) untergliedern. Da diese verschiedenen Schichtstufen eine ähnliche Faziesausbildung auf-

weisen und kontinuierlich ineinander übergehen, hat der Verfasser nur die Einheit Silur auskartiert, da es nicht Sinn dieser vorliegenden Arbeit sein kann, feinstratigraphische Probleme zu lösen.

Die silurischen Sedimentite bestehen in ihrem tieferen Teil (Llallagua) aus einer einheitlichen Wechsellagerung von Quarziten/Sandsteinen und mengenanteilmäßig untergeordneten Schluff-/Tonsteinen. Die Quarzite und Sandsteine sind dunkelgrau und grün-grau und verwittern hellbraun. Sie sind mittel- bis grobkörnig, feingeschichtet und zeigen im höheren Teil z.T. Kreuzschichtung. Die Bankmächtigkeit schwankt zwischen 5 cm und 1 m.

Die schwarzen bis dunkelgrauen Schluff- und Tonsteine sind feinstgeschichtet. Die Bankmächtigkeiten gleichen denen der Quarzite und Sandsteine. Fossilien wurden in diesem tieferen silurischen Teil nicht gefunden.

Den mittleren Teil der silurischen Sedimentite (Pampa) nehmen zumeist mittelbraune bis dunkelbraune Schiefertone mit eingelagerten dünnen Sandsteinbänken ein (Abb.11). Diese Schiefertone sind feinstgeschichtet und fossilreich.

Die Sandsteinlagen haben eine grau-grünliche bis mittelbraune Farbe. Sie sind feinkörnig, feingeschichtet und glimmerreich. Eine Bankung ist in den Sandsteineinschaltungen nur schwer zu erkennen.

Die Bankmächtigkeit beträgt im mittleren Teil ca. 5 cm. Der Bruch der Handstücke ist kantig-kantenrund und die Erosion erfolgt kleinplättrig und bröckchenhaft.

Die Gesteine sind mit schwarzen und orange-farbenen Flechten überwachsen.

Die aus den mittleren silurischen Schichten hergestellten Dünnschliffe zeigen einen dicht gepackten, feinkörnigen Sandstein, der durch verschiedene Gehalte an Tonmineralen, Glim-

mern und gefeldertem, stark verunreinigtem, blastischem Material einen Lagenwechsel erkennen läßt (Abb.12). Die dicht gepackten, verzahnten Quarzindividuen mit unregelmäßiger Korngestalt lassen auf eine Um- bzw. Weiterkristallisation schließen. Der Zement in sammelkristallierter Form zeigt diverse Glimmer und glimmerartige Minerale (Muskowit, Serizit, Chlorit, etc.). Die Biotit-Aggregate sind z.T. ummantelt. Die Glimmer zeigen einen hohen Grad an Einregelung in Richtung der Schichtung. Weiterhin beobachtet man etwas Zirkon und sehr wenig Feldspat (Plagioklas) im Dünnschliff.

Folgende Fossilien wurden vom Verfasser im mittleren Teil der silurischen Ablagerungen gefunden und von BRANISA (schriftl. Mitt.) bestimmt:

Orthoceras sp.

Harringtonia cf. *acutiplicata* (KAYSER) - (Abb.13)

Nucula boliviana SWARTZ

Gastropoda indet.

Crinoidea indet.

In der gleichen Region fanden COCA (1972) und JAUREGUI (1969) noch folgende Fossilien:

Chonetes sp.

Heterorthella tacopayana (KOSLOWSKI)

Trimeras cf. *T. linaresi* (SALTER)

Hormotoma sp.

Nuculites sp.

In dem mittleren Teil ist innerhalb der Sedimentgesteine eine Faltung schwach entwickelt. Die Klüftung ist im Kleinbereich intensiv, wobei die Klüfte mit Quarz, Pyritkristallen und Erz wieder verheilt sind (DAROCA, 1968).

Diese mittleren Silur-Sedimente weisen den größten Anteil an Gesteinen des Silur im Bearbeitungsgebiet auf. Zum Hangenden zu werden die Ablagerungen wieder sandiger und die vorher

vorherrschende tonige Ausbildung tritt zurück (Catavi).

Diese höheren silurischen Schichten bestehen aus hellgelben bis mittelbraunen, graugrünen, fein- bis mittelkörnigen Sandsteinen. Sie sind glimmerreich, zumeist kompakt und ohne erkennbare Schichtung ausgebildet. Die Bankmächtigkeit schwankt zwischen 3 cm und 1 m. Die Erosion erfolgt zu kleinen Brocken und Plättchen.

ZABALA (1967) hat in den höheren sandigen Teilen der Silur-Serien folgende Fossilien gefunden:

Australocoelia tourteloti (GILL & BONCOT)

Dalmanella sp.

Orthoceras sp.

Eine Faltung ist auch in den höheren Teilen schwach ausgebildet. Die Klüftung ist im cm- bis m-Bereich intensiv.

Nach der Ablagerung der Sedimente der Zapla-Formation setzt mit den landnah abgelagerten Llallagua-Schichten ein altpaläozoischer Sedimentationszyklus ein. Die nach COCA (1972) im neritischen bis bathyalen Bereich eines epikontinentalen Meeres abgelagerten Schiefer der Pampa-Schichten zeigen eine rasche Vertiefung und Erweiterung des Sedimentationsraumes an. Die darauf folgende Ablagerung der sandigen Catavi-Schichten läßt auf ein Anheben dieses Sedimentationsraumes schließen.

Die gesamten silurischen Schichten zeigen eine z.T. intensive Klein- bis Großklüftung auf (mm- bis Hundertmeterbereich). Verschiedene kleine Transversal- und Horizontalverschiebungen sind zu erkennen.

Die Sedimentite sind in sich z.T. stark, z.T. nur schwach verfaultet. Im SSW-Bereich ihres Vorkommens liegen sie subhorizontal, während sie zum Cerro Huayna Potosí hin immer stärker nach SSW einfallen und am unmittelbaren Kontakt zu den Zapla-Sedimentiten steil nach SSW einfallen, bzw. saiger stehen oder nach NNE überkippt gelagert sind.

Die aufgeschlossene Mächtigkeit der silurischen Serien beträgt im Bearbeitungsgebiet ca. 2000 m.

Die silurischen Sedimentgesteine weisen ebenfalls im Luftbild verschiedene charakteristische Parameter auf, die es erlauben, diese Schichten von den sie umgebenden anderen geologischen Einheiten zu trennen und auszukartieren:

- 1.) lithologische Ausbildung : Schiefer
- 2.) Homogenität : ziemlich einheitlich
- 3.) Oberflächenstruktur : glatt bis schwach rauh
- 4.) relative Härte : weich
- 5.) Grauwert : 1 - 5
- 6.) Klüftung : Kleinklüfte, wenige Großklüfte
- 7.) Klüftigkeit (K) : $1,3 \text{ km}^{-2}$
- 8.) Kluftdichte (D_K) : $0,4 \text{ km}^{-1}$
- 9.) Entwässerungsform : subparallel bis subdendritisch
- 10.) Entwässerungsdichte (D_E) : $7,49 \text{ km}^{-1}$

Mit dem geringen Grauwert 1 - 5 lassen sich die silurischen Sedimentite im Luftbild gut erkennen. Auch das weiche, morphologisch sanfte Formen bildende Gestein, die sehr geringe Klüftigkeit und Kluftdichte und die im Gegensatz dazu höchste Entwässerungsdichte aller Gesteine in diesem Gebiet geben dem Interpreten gute Unterscheidungsmerkmale, um diese Schichten zu erkennen und auszukartieren.

8.2.1.d) Feinsandstein (Devon)

Anschließend an die mächtigen silurischen Serien treten im Bearbeitungsgebiet devonische Ablagerungen auf.

Man findet diese Sedimentgesteine im SW des untersuchten Gebietes. Sie bilden den NE-Teil der Hügelkette von Huilaque aus.

Neben der für die Devon-Stratigraphie sehr wichtigen Arbeit von WOLFART & VOGES (1968) sind Beiträge erschienen von:

BARTHEL & BARTH (1972), BRANISA (1965 und 1969), CHAMOT (1969), DÁVILA & RODRIGUEZ (1967), FRICKE u.A. (1964), HARRINGTON (1967) und SCHLATTER & NEDERLOF (1966).

Auf dem Altiplano bilden die Devonschichten die Basis der Kreide/Tertiär-Beckenfüllungen. Man findet sie in den Kernen der Antiklinalen.

Die Sedimente werden durch glimmerführende, feinkörnige Sandsteine bzw. sandige Schiefer gebildet. Die Farbe der devonischen Schichten ist bläulich-schwarz bis schwarz, während sie im verwitterten Zustand mittelgrau bis mittelbraun aussehen.

Der Bruch ist scharfkantig und die Bankmächtigkeit schwankt zwischen 3 cm und 20 cm. Die Quarzkörner sind makroskopisch nicht zu erkennen. Die Verwitterung erfolgt zu kleinen Bröckchen, wobei sich die Schichten als verwitterungsanfällig erweisen. Braune Fe-Oxydationsüberzüge überdecken die Gesteine ebenso wie grünweiße, gelbgrüne und ocker-farbene Flechten. Die sedimentäre Schichtung ist durch Farbwechsel zu erkennen.

Auch im Dünnschliff zeigt sich die starke Glimmerführung der sandigen Schiefer oder feinkörnigen Sandsteine deutlich. Die Quarzkörner sind subangular (0,05-0,2 mm) ausgebildet. Die Sedimente sind feingeschichtet und weisen einen hohen Einregelungsgrad der Glimmer in ss auf (Abb.14). Teilweise ist ein feiner Lagenbau von mehr glimmerreichen und mehr sandigen Partien zu beobachten. Z.T. sind aber auch inhomogene, mit wechselnden Quarz-Glimmer-Tonmineralgehalten chaotische Strukturen formende Partien zu erkennen. Im Dünnschliff beobachtet man weiterhin Hämatitpartikel (z.T. schlierig ausgezogen), Limonitkörnchen und sehr wenig Feldspat (Plagioklas). Unter den Glimmern herrscht der Biotit anteilmäßig vor, nur untergeordnet treten Muskowit-, Serizit- und Chloritpartikel auf.

Die devonischen Sedimentite sind ziemlich fossilreich. Vor allem WOLFART & VOGES (1968) befaßten sich mit den Trilobiten

des Devons in Bolivien.

Die Sedimente des Devons wurden wahrscheinlich in geringen Meerestiefen abgelagert. Nach BARTH (1972) endet mit dem Herausheben des andinen Ablagerungsraumes im Laufe des Devons der altpaläozoische Sedimentationszyklus, sodaß zum Hangenden hin kontinental-klastische Ablagerungen zu erwarten sind.

Klüfte treten zumeist nur in kleinen bis mittelgroßen Größenordnungen auf und können z.T. mit 1-2 mm breitem, sekundärem Quarz verheilt sein.

Die Schichten sind schwach verfaultet. Sie liegen aber insgesamt subhorizontal.

Die aufgeschlossene Mächtigkeit der devonischen Serie beträgt ca. 1000 m.

Im Luftbild kann man die Sedimentite des Devon anhand verschiedener Parameter ausgliedern und damit kartieren:

- 1.) lithologische Ausbildung: Feinsandstein
- 2.) Homogenität : einheitlich
- 3.) relative Härte : ziemlich weich
- 4.) Oberflächenstruktur : glatt bis schwach rauh
- 5.) Grauwert : 6 - 9
- 6.) Klüftung : Kleinklüfte, wenige Großklüfte
- 7.) Klüftigkeit (K) : nicht zu ermitteln
- 8.) Kluftdichte (D_K) : " " "
- 9.) Entwässerungsform : subdendritisch
- 10.) Entwässerungsdichte (D_E): $7,00 \text{ km}^{-1}$

Im Luftbild erkennt man die devonischen Serien an ihren weichen, sanften morphologischen Formen und an ihrer gegenüber der Umgebung höheren Entwässerungsdichte. Anhand ihres Grauwertes kann man sie jedoch nur schwer von den sie umrahmenden Sedimenten des Tertiärs bzw. Quartärs unterscheiden, da alle drei lithologischen Einheiten von dichten Grasbüscheln bedeckt sind und somit den spezifischen Grauwert überdecken.

Da die Serien vor allem Kleinklüfte aufweisen und nur sehr wenige Großklüfte im Luftbild erkennen lassen, waren die Parameter Klüftigkeit und Kluftdichte nicht zu ermitteln.

8.2.1.e) Sandstein (Kreide)

Die paläozoischen Sedimentgesteine werden regional von wiederum hauptsächlich terrigenen, klastischen Ablagerungen diskordant überlagert. Meist als isolierte Muldenfüllungen erhalten, haben sie oberkretazisches Alter.

Das Mesozoikum wird im Bearbeitungsgebiet allein durch Kreidesedimentite repräsentiert.

Man findet sie im SE des Gebietes in nur geringen Vorkommen. Arbeiten über diesen erdgeschichtlichen Abschnitt in Bolivien haben vor allem BRANISA et al. (1964, 1966, 1969), KRIZ & CHERRONI (1966), LOHMANN & BRANISA (1962), RUSSO & RODRIGO (1965), RODRIGO (1964) und SCHAEFFER (1963) herausgebracht.

In der Region Huayna Potosí und Umgebung haben sich speziell CARRASCO (1963) und ZABALA (1967) mit der Stratigraphie der kretazischen Sedimentite befaßt.

Die kretazischen Serien werden in den tieferen Teilen durch tonige Sandsteine mit unregelmäßigen Einschaltungen von Gips und in den höheren Teilen durch rote, kalkige Sandsteine gebildet. Die tonigen Sedimentgesteine zeigen keine Schichtung, feines Korn und eine rötliche Farbe. Dagegen beobachtet man in den kalkigen Sandsteinen der höheren Partien gut zu erkennende, mittelgroße Quarzkörner, eine intensive hellrote Farbe und eine z.T. grob ausgebildete Schichtung.

In den gesamten Kreidesedimentiten im Bearbeitungsgebiet sind dem Verfasser keine Fossilfunde bekannt. Aus einem Ver-

gleich der Lithologie läßt sich jedoch der Schluß ziehen, daß die hier beschriebenen Serien als ein Äquivalent zu den kretazischen Puca-Schichten anzusehen sind, die nach FRICKE & VOGES (1968) im S des Bearbeitungsgebietes anzutreffen sind und unter kontinentalen Bedingungen abgelagert wurden.

Aufgrund der schlechten Aufschlußlage und aufgrund der Salinareinschaltungen in den tieferen Teilen der kretazischen Serien, die eine ausgeprägte tektonische Mobilität bedingen, ist eine einheitliche Lagerung dieser Schichten nicht zu ermitteln. Eine Klüftung ist ebenfalls nur schwach zu erkennen.

Die aufgeschlossene Mächtigkeit der kretazischen Schichten beträgt im Bearbeitungsgebiet ca. 300 m.

Analog zu den Gesteinen der Zapla-Formation lassen auch die geringmächtigen Vorkommen der kretazischen Sandsteine im Luftbild nur wenige charakteristische Unterscheidungsmerkmale erkennen:

- 1.) lithologische Ausbildung: Sandstein
- 2.) Homogenität : ziemlich einheitlich
- 3.) Oberflächenstruktur : sandig-rauh
- 4.) relative Härte : ziemlich weich
- 5.) Grauwert : 1 - 3
- 6.) Klüftung : nicht zu ermitteln
- 7.) Klüftigkeit (K) : " " "
- 8.) Kluftdichte (D_K) : " " "
- 9.) Entwässerungsform : " " "
- 10.) Entwässerungsdichte (D_E): " " "

Im Luftbild sind diese Serien durch ihre isolierte Lage zu erkennen. Von den sie umgebenden Moränensedimenten unterscheiden sie sich durch einen sehr hellen Grauton und durch morphologisch härtere Formen.

Aufgrund der sehr geringmächtigen Vorkommen der kretazischen Sedimentite konnten die Parameter Klüftung, Klüftigkeit,

Kluftdichte, Entwässerungsform und Entwässerungsdichte nicht ermittelt werden.

8.2.1.f) Sandstein (Tertiär)

Die mächtigen kontinental ausgebildeten, tertiären Becken-sedimentite des Altiplano ragen in Inselbergen und größeren Hügelgruppen an den verschiedensten Stellen über die quartären Ablagerungen hinaus. Große zusammenhängende Gebiete, in welchen Tertiär zu Tage tritt, sind auf den nördlichen Teil des Altiplano, zwischen Titicaca-See und Corque ($18^{\circ} 22'$) beschränkt (AHLFELD, 1953).

Die im Bearbeitungsgebiet die tertiären Sedimentite repräsentierende Aranjuez-Formation (s.geol.Karte LA PAZ, 5944, La Paz 1967) wird an die Basis der tertiären Schichten gestellt. Sie liegt im untersuchten Gebiet diskordant auf devonischen Serien. Man kann die tertiären Serien im SW des Bearbeitungsgebietes beobachten, wo sie das Hügelland von Huilaque mitaufbauen.

Mit den Sedimentiten des Tertiärs haben sich in letzter Zeit vor allem AHLFELD (1953 und 1962b), ASCARRUNZ (1963), CAR-RASCO (1963), EVERNDEN, KRIZ & CHERRONI (1966), MEYER & MURILLO (1961) und RODRIGUEZ (1966) befaßt.

Nach AHLFELD (1953) gehören die tertiären Sedimentite der Formation Corocoro an. MEYER & MURILLO (1961) teilen diese Einheit noch einmal in die Gruppen Chuquichambi und Huayllamarca. NEWELL (1949) benannte die tertiären Sedimentite, als einer der ersten Bearbeiter, "Puna-Gruppe".

Im untersuchten Gebiet werden die Sedimentite der Formation Aranjuez durch Konglomerate und Feinsandsteine in den tieferen Teilen und durch Grobsandsteine in den höheren Teilen gebildet (Abb.15).

Deshalb trennt RODRIGUEZ (1966) in einem benachbarten Gebiet die tertiären Serien nur in zwei Gruppen: "Conglomerado Basal - Areniscas Superiores".

Die Konglomerate haben eine rotbraune, tonig-sandige Matrix. Die Gerölle sind zumeist gut gerundet (Abb.16). Ihr Durchmesser schwankt zwischen 1 cm und 50 cm. Sie bestehen aus Relikten paläozoischer Sandsteine, Quarzite, Metamorphite, Plutonite und Kalke. Sie zeigen zudem eine schlechte Sortierung.

Bankung und Schichtung sind nicht zu erkennen. Die Konglomerate haben eine geringe Erosionsresistenz. Sie sind fossil-leer bis fossilarm.

Die Feinsandsteine sind ziegelrot, ziemlich hart, feinkörnig und haben gut klassierte und gut gerundete Quarzkörner.

Dagegen weisen die Grobsandsteine in den höheren Lagen der Formation Aranjuez eine mehr gelbliche Farbe auf, dazu mittelgroße, gut klassierte und gut gerundete Quarze. Das Gestein ist bröckelig, jedoch ist die Erosion insgesamt nicht stark. Man beobachtet gutgeschichtete Bänke, die eine Bankmächtigkeit von 0,5 m bis 3 m erreichen.

Der Dünnschliff zeigt subangular bis gut gerundete (0,1 mm bis 1mm) Quarzkörner im Grobsandstein der höheren Teile der tertiären Serien. Die Quarze löschen meist undulös und sind z.T. kataklastisch. Sie stammen vielfach von Pegmatiten oder Granitdachregionen her, was man an der Führung charakteristischer Flüssigkeitseinschlüsse mit Gasbläschen erkennt. Der Zement ist limonitisch-karbonitisch mit z.T. stark vergrößerten Karbonatkristallen. Im Dünnschliff erkennt man außerdem subangulare Gesteinseinschlüsse von feinkörnigen Quarziten und glimmerhaltigen Sandsteinen. Das Gestein ist feldspatfrei (Abb.17).

Die Lagerung der tertiären Sedimentite zeigt ein zumeist steiles, nach SW gerichtetes Einfallen. Eine Faltung wurde nicht beobachtet.

In diesen klastischen Sedimentgesteinen überwiegen die Klüfte im m- bis 100m-Bereich, die oft vertikal verlaufen.

Die aufgeschlossene Mächtigkeit der tertiären Serien dürfte im Bearbeitungsgebiet ca. 3500 m nicht übersteigen.

Auch bei den tertiären Sandsteinen lassen sich im Luftbild verschiedene typische Unterscheidungsmerkmale beobachten, nach denen man diese Schichten auskartieren kann:

- 1.) lithologische Ausbildung: Sandstein
- 2.) Homogenität : durch Materialwechsel nur relativ einheitlich
- 3.) Oberflächenstruktur : z.T.sandig-rauh, z.T. glatt bis schwach gewellt
- 4.) relative Härte : wechselnd, relativ hart
- 5.) Grauwert : 5 - 9
- 6.) Klüftung : wenige Mittel- bis Großklüfte
- 7.) Klüftigkeit (K) : nicht zu ermitteln
- 8.) Kluftdichte (D_K) : " " "
- 9.) Entwässerungsform : subparallel bis subdendritisch
- 10.) Entwässerungsdichte (D_E): $4,42 \text{ km}^{-1}$

Im Luftbild sind die weichen morphologischen Formen der Liegend-Konglomerate und die dickbankigen, groben Hangend-sandsteine zu erkennen und gut gegenüber den devonischen Schichten und den sie ebenfalls umgebenden Moränensedimenten abzugrenzen.

Aufgrund der wenigen, im Luftbild erkennbaren, Mittel- bzw. Großklüfte konnten die Parameter Klüftigkeit und Kluftdichte nicht ermittelt werden. Die Entwässerungsdichte ist gegenüber den anderen geologischen Einheiten -ausgenommen sind die Moränensedimente des Quartärs- geringer ausgebildet.

8.2.1.g) Granit

Neben den marinen und kontinentalen Ablagerungen kommen saure Intrusionsgesteine triassischen Alters im N des Bearbeitungsgebietes vor. Sie formen den Cerro Huayna Potosí mit seinen scharfen Graten und Spitzen.

Über die Granite der Ostkordillere liegen Arbeiten von AHLFELD (1970), BARD et al. (1974), CLARK & FARRAR (1973), EVERNDEN (1961), LJUNGGREN (1961 und 1962), LJUNGGREN & RADELLI (1964), SAAVEDRA (1971), THORMANN (1968) und VISTELIUS & FULLER (1969) vor.

AHLFELD (1970) unterscheidet für die sauren Plutonite drei Intrusionsphasen im Bereich der Ostkordillere:

- 1.) präorogene Granite (varistische Phase) -- Perm oder älter
- 2.) synorogene Granite (varistische Phase) -- Oberperm-Jura
- 3.) präorogene Granite (andine Phase) -- Miozän

Altersbestimmungen werden von CLARK & FARRAR (1973), EVERNDEN (1961) und MIRANDA (1971) in ihren Arbeiten angegeben. Anhand der K-Ar-Methode und der Pb- α -Methode wurde ein Alter von ca. 211 Mill. Jahren (Obere Trias) festgestellt, was den Huayna Potosí-Granit nach AHLFELD (1970) in die varistische, synorogene Phase stellt.

Der Granit des Cerro Huayna Potosí hat eine weißliche bis hellgraue Farbe, die im verwitterten Zustand in mittel- bis dunkelgrau übergeht. Der frische Bruch ist scharfkantig und die Verwitterung schafft die für Granite so typischen, großen Blockschuttfelder. Die Gesteine sind mit gelbgrünen und schwarzen Flechten überzogen.

Unter dem Mikroskop erkennt man einen Zweiglimmergranit mit sehr einschlußreichen (Zwei-Phasen-Einschlüsse) Quarzen, die häufig undulös auslöschen und gefeldert sind (Abb.18).

Der gegenüber dem Plagioklas- sehr hohe Orthoklas-Anteil wird durch einen wenig zersetzten, z.T. schwach kaolinisierten

Mikroklin-Perthit repräsentiert, während bei den Plagioklasen die Albit-Komponente stark überwiegt. Der zumeist getrübbte, serizitisierte und saussuritisierte saure Plagioklas ist verzwillingt nach dem Albit-Gesetz und zeigt einen tafelig-hypidiomorphen Habitus.

Man erkennt weiterhin Biotite mit hypidiomorphen Tafelumrisen, Hellglimmer, die sekundär mit Chlorit verwachsen sind und hypidiomorph bis poikilitisch vorkommen und Chlorite mit Titanitabsonderungen auf der Basisfläche. Untergeordnet treten noch Titanit, Epidot, Apatit und, als Einschlüsse im Quarz und im Feldspat, Zirkonsäulchen auf.

Nach dem eben beschriebenen Modalbestand und der systematischen Klassifikation der Plutonite nach RONNER (1963) handelt es sich hier um einen Zweiglimmer-Granit. JAUREGUI (1961) hat anhand seiner Dünnschliffbestimmungen festgestellt, daß dieser saure Intrusionskörper ein Quarz-Biotit- oder Quarz-Muskowit-Monzonit ist. MIRANDA (1971) hat ihn als einen quarzigen Monzonit (=Adamellit) oder Zweiglimmer-Granodiorit angesehen.

In dem sauren Intrusionskörper ist eine ausgeprägte Klüftung im cm- bis 100m-Bereich zu erkennen.

Die granitischen Intrusionsmassen des Cerro Huayna Potosí weisen im Luftbild ebenfalls typische Interpretationsparameter auf:

- 1.) lithologische Ausbildung: Granit
- 2.) Homogenität : einheitlich
- 3.) Oberflächenstruktur : rauh, bröckelig
- 4.) relative Härte : hart
- 5.) Grauwert : 3 - 7
- 6.) Klüftung : Mittel- bis Großklüfte
- 7.) Klüftigkeit (K) : $24,8 \text{ km}^{-2}$
- 8.) Kluftdichte (D_K) : $10,2 \text{ km}^{-1}$
- 9.) Entwässerungsform : dendritisch bis subdendritisch
- 10.) Entwässerungsdichte (D_E): $6,56 \text{ km}^{-1}$

Durch seine scharfkantigen, harten, morphologisch positiven Formen ist der Granit im Luftbild gut zu erkennen. Nur seine Abgrenzung gegenüber den Sedimentgesteinen des Ordoviz fällt wegen der hohen Ähnlichkeit (Tab.4) im Luftbild einigermaßen schwer.

Beide geologische Einheiten weisen die gleiche Ausbildung der Parameter Homogenität, Oberflächenstruktur, relative Härte und Grauwert auf. Auch in den Unterscheidungsmerkmalen Klüftung und Entwässerungsdichte zeigen sie keine großen Unterschiede. Die Klüftigkeit und die Kluftdichte lassen dagegen die höchsten gemessenen Werte in diesem Gebiet erkennen. Allein die längeren, einheitlicher ausgebildeten Klüfte und die geringere Klüftigkeit und Kluftdichte der ordovizischen Sedimentgesteine lassen eine Trennung dieser beiden Gesteinstypen im Luftbild zu.

8.2.1.h) Lockersedimente (Quartär)

Das quartäre Lockermaterial, das im Untersuchungsgebiet auftritt, wird nur nach seiner morphologischen Ausbildung und seinem Bildungsraum im Luftbild unterschieden.

Die Lockersedimente treten im Bearbeitungsgebiet in großem Umfang auf. Sie bilden fast den gesamten S des Gebietes und sind am Fuße aller Steilhänge zu beobachten.

Mit den Quartärsedimenten haben sich vor allem in jüngerer Zeit ARCE & MONTES DE OCA (1965), DOBROVOLNY (1962 und 1969), FRAKES & CROWELL (1969), PUTZER (1968), RODRIGUEZ (1966) und ZABALA (1967) beschäftigt.

Dabei stellt DOBROVOLNY (1962) folgendes Schema für die quartären, glazialen Sedimente auf:

- Grava Miraflores (rezentes Material)
- Drift Choqueyapu (4.Glazial)
- Grava Irapavi

-- Grava Pampajsi	(3. Interglazial)
-- Drift Milluni	(3. Glazial)
-- Form. Purapurani	(2. Interglazial)
-- Drift Calvario	(2. Glazial)
-- Cinerita Chyini	(1. Interglazial)
-- Drift Patapatani	(1. Glazial)

Im Kartierungsgebiet repräsentieren die Moränensedimente nach COCA (1972) und TROLL & FINSTERWALDER (1935) die 3. und 4. Eiszeit. Die Moränen der 3. Eiszeit überdecken dabei flächenhaft große Gebiete im mittleren und südlichen Teil des Bearbeitungsgebietes, während die Lockersedimente der 4. Eiszeit in den Tälern um den Cerro Huayna Potosí herum, im Tuni- und im Millunital in geringmächtigen Vorkommen zu finden sind. Nur diese Moränensedimente bilden die typischen, hangaufwärts gekrümmten oder annähernd hangparallelen Wälle (s. auch Kap. 5.2.).

Das Moränenmaterial liegt unsortiert nebeneinander in sehr groben Blöcken, die Durchmesser von über 50 cm erreichen können, und in sehr feinem Schutt und zeigt eine sehr unregelmäßige Oberflächenstruktur.

Im Luftbild kann man folgende charakteristische Unterscheidungsmerkmale neben den oben schon erwähnten bei der Interpretation der quartären Moränensedimente beobachten:

- 1.) lithologische Ausbildung: Lockersedimente
- 2.) Homogenität : Materialwechsel, jedoch insgesamt relativ einheitlich
- 3.) Oberflächenstruktur : unregelmäßig
- 4.) relative Härte : weich
- 5.) Grauwert : 4 - 8
- 6.) Klüftung : nicht zu ermitteln
- 7.) Klüftigkeit (K) : " " "
- 8.) Kluftdichte (D_K) : " " "
- 9.) Entwässerungsform : parallel bis subparallel
- 10.) Entwässerungsdichte (D_E): $3,81 \text{ km}^{-1}$

Sehr typisch für die quartären Moränensedimente ist die durch ein noch unausgereiftes, junges Entwässerungssystem bedingte parallele bis subparallele Entwässerungsform und die sehr geringe Entwässerungsdichte. Auch das bei einem flächenmäßig weit verbreiteten Vorkommen dieser Sedimente im Bearbeitungsgebiet charakteristische Fehlen von Klüftung und -dadurch bedingt- von Klüftigkeit und Kluftdichte ist als Unterscheidungsmerkmal und Interpretationshilfe gut geeignet.

Sowohl während der Geländebegehung als auch bei der Luftbildinterpretation konnten die z.T. sehr gut ausgebildeten Moränenwälle der 4. Eiszeit in Form von End- und Seitenwällen beobachtet werden.

Ebenso gut konnte man die Moränensedimente der 3. Eiszeit erkennen, die in dieser Alt- und Jungmoränenlandschaft (s.auch Kap. 5.2.) eine in sich unregelmäßig ausgebildete Oberfläche im Luftbild aufweisen. Im Gegensatz zu den Sedimenten der 4. Eiszeit lassen sich jedoch keine Moränenwälle beobachten.

Die im SW und gesamten N des Bearbeitungsgebietes auftretenden Sturz- und Schwemmkegel erscheinen im Luftbild heller als das anstehende Festgestein, da es sich hier um relativ junge, unbewachsene Schüttungen handelt.

Alle Sturz- und Schwemmkegel haben eine typische Oberflächenstruktur. Die "Fließbahnen" des herabstürzenden Lockermaterials sind, ebenso wie die gravitative Trennung von feinerem und gröberem Material, im Luftbild gut zu erkennen. Sie sind durch ihre Form und Lage am Fuß von Erosionsrinnen und Felswänden eindeutig zu klassifizieren.

Die im gesamten Untersuchungsgebiet in geringmächtigen Aufschüttungen beobachteten fluviatilen Terrassen haben eine ebene, annähernd horizontale Oberfläche und lassen sich durch ihre Ablagerung in der Nähe von rezenten oder subrezentem Talsohlen leicht erkennen und auskartieren. Sie sind vegetationsfrei und erscheinen im Luftbild weißlich-grau.

8.2.2. Tektonik

Das Gebiet Huayna Potosí wird nicht nur morphologisch und stratigraphisch, sondern auch tektonisch in zwei Abschnitte unterteilt:

- a) Altiplano
- b) Königskordillere

Störungsscharen grenzen den Altiplano im W von der Westkordillere und im E von der Königskordillere ab. Diese Störungsscharen sind im W wegen der jungen vulkanischen Überdeckung und der alluvialen Aufschüttung nur ungenau zu erkennen. Das Coniri-Störungssystem (AHLFELD, 1970) als Begrenzung gegenüber der Königskordillere ist leichter faßbar, wenn es auch zwischen Oruro und dem N von La Paz unter quartären Sedimenten verborgen ist.

Die Kenntnisse über die Tektonik und ihre zeitliche Einordnung im Gebiet des Altiplano sind noch gering und recht unsicher. An der Basis des Altiplano vermutet man präkambrisches Gebirge, das als ein altes, stabiles Element zwischen den mobilen Andenräumen im E und W angesehen werden kann. Eine erste tektonische Bewegungsphase wird in dem Zeitraum Oberdevon-Perm vermutet. Zu vereinzelt Evaporitausscheidungen kam es im jüngsten Paläozoikum/älteren Mesozoikum, wobei sich im weiteren Verlauf der Erdgeschichte salinartektonische Einflüsse in diesem Gebiet bemerkbar machten (LOHMANN, 1970).

Nach AHLFELD (1953) erfolgte die Trennung der Altiplanosenke vom paläozoischen Block der West- und Ostkordillere im Alttertiär. Die Einsenkung setzte sich stufenweise während des gesamten Tertiärs fort.

Der Altiplanograbens, der während dieser Zeit entstand, wurde somit zum Sammelbecken für die eingeschütteten Sedimente der Ost- und Westkordillere, wobei sich eine kontinentale und klastische Schichtenfolge von mehr als 10.000 m Mächtigkeit

anhäufte. Die tertiäre Andenfaltung bewirkte im Altiplano eine sogenannte Vorlandfaltung mit sehr breiten, flachen Mulden und schmalen Sattelaufwölbungen. Steil nach W einfallende Aufschiebungen von z.T. sehr großer Längserstreckung entstanden durch einen nach E gerichteten tangentialen Schub parallel zu den Sattelachsen, meist auch in diesen selbst. In diesen Zeitraum ist auch die von LOHMANN (1970) vertretene Salztektonik einzuordnen.

Am Ende des Tertiärs wird das soeben beschriebene, durch Blocktektonik geschaffene, intramontane Relief durch die erudierten Sedimente der Ost- und Westkordillere aufgefüllt. Daneben gestalten im Quartär glaziale und fluviatile Ablagerungsprozesse die heutige morphologische Ausbildung des Altiplano.

Wie bereits erwähnt, trennt die Coniri-Störungsschar den Altiplano und die aus vorwiegend paläozoischen Schichten aufgebauten Ostanden, welche aus diesem Grund auch allgemein "bloque paleozoico" genannt werden. Die Grenze der Ostanden nach E zur Subandinen Zone hin zeigt sich weniger morphologisch als geologisch.

Die tektonischen Ereignisse, welche in den Ostanden vom späten Paläozoikum bis zum Ende des Mesozoikum stattgefunden haben, sind im einzelnen noch wenig untersucht und weitgehend unbekannt.

Erst im jüngeren Tertiär wurde der gesamte Andenblock von gebirgsbildenden Kräften erfaßt. AHLFELD (1970) stellt die Hauptfaltungsphase in das tiefere Pliozän und die Haupthebungsphase in das höhere Pliozän. DOBROVOLNY (1962) glaubt, daß diese Hebungsphase bis in das Pleistozän hinein anhielt. Im Gefolge dieser tektonischen Ereignisse drangen zwischen dem Jungpaläozoikum und Jungtertiär zu verschiedenen Zeiten (AHLFELD, 1970) mächtige saure Magmen in die Sedimentschichten ein. Der Vulkanismus war noch im Quartär im ostandinen Raum stellenweise wirksam.

Das großtektonische Lineament, das als Elbow-Linie (SCHLATTER-NEDERLOF, 1966) die Beni-Tiefebene von der des Gran-Chaco trennt und sich in Form der Colorado-Verwerfung (ROD, 1960) in der subandinen Zone fortsetzt, zeigt sich auch als großangelegte Schwächezone im paläozoischen Block. Sie trennt die Königskordillere im N von Bolivien von dem Ostbolivianischen Bergland und versetzt sie vermutlich nach W (AHLFELD, 1970). Mit diesem Block wurden auch die Tiefengesteinskörper samt ihrem Mantel von metamorphen paläozoischen Sedimenten im Tertiär herausgehoben und zerbrochen. Im Pleistozän wurden sie dann durch die Erosion ihrer Sedimentumhüllungen freigelegt.

Die Tektonik im Gebiet Huayna Potosí ist durch verschiedene, zeitlich aufeinanderfolgende Phasen der Deformation gekennzeichnet (COCA, 1972; MARTÍNEZ, 1972 ; MARTÍNEZ et al., 1971; ZAPATA, 1971):

- 1.) Das kaledonische Orogen ist für die Lage des tieferen Silur in diesem Gebiet verantwortlich.
- 2.) In der Zeitspanne postpermisch-präkretazisch bewegte das varistische Orogen die gesamten paläozoischen Sedimentgesteine. Man beobachtet weit gespannten Faltenbau mit vertikalen, E-W verlaufenden Faltenachsen und mit einer begleitenden Schieferung, die Brüche und Falten erfaßte. Über die gefalteten und zerbrochenen Sedimentite kamen horizontal und diskordant kretazische Serien zur Ablagerung.
- 3.) Während oder nach der Ablagerung der Sedimentite der oberen Kreide bewirkte eine tektonische Phase der Zerrung die Ausbildung von großen Störungen und ist wahrscheinlich auch für die vulkanische Tätigkeit in dieser Region verantwortlich.
- 4.) In der anschließenden andinen Phase herrschten bruchtektonische Strukturen vor. In diese Phase fallen die großen Auf- und Abschiebungen entlang tiefgreifender Störungen. Dabei wurden neben meso- und känozoischen Sedimentiten auch die gefalteten paläozoischen Serien miterfaßt.

Im Bearbeitungsgebiet ist der Huayna Potosí-Granit das den eben beschriebenen tektonischen Bauplan beeinflussende Element (Fig.25). Der Batholith ist von N her auf die paläozoischen Sedimentgesteine aufgeschoben worden. An seiner Nordflanke fallen die ordovizischen Schichten flach nach N hin ein. Dagegen erkennt man an seiner Südflanke saiger bis leicht überkippt einfallende altpaläozoische Sedimentite (Ordoviz-Silur). Sie bilden die NE-Flanke einer im Streichen des Gebirges (NW-SE) verlaufenden Synklinale (varistische Phase).

Die präandine und andine Phase repräsentieren tiefgreifende Störungen, die die Synklinale im S des Cerro Huayna Potosí zerschneiden und auch im N des Bearbeitungsgebietes in den ordovizischen Sedimentiten zu verfolgen sind.

In den gesamten paläozoischen Sedimentiten und in dem Granitmassiv des Cerro Huayna Potosí herrscht eine intensive Groß- und Kleinklüftung (einige mm bis mehrere 100 m) vor.

Bei einem Vergleich der Klüftmeßbereiche der im Gelände gemessenen Klüfte anhand des SPEARMAN Rang-Korrelations-Tests (Tab.3) erkennt man keine Korrelation der verschiedenen Meßbereiche untereinander.

Es wurden insgesamt 380 Klüfte gemessen, welche sich wie folgt auf die vier Klüftbereiche verteilen:

d) Granit	: 114 Klüfte
c) Silur	: 62 Klüfte
b) Oberstes Ordoviz	: 104 Klüfte
a) Ordoviz	: 100 Klüfte

Trotz der negativen Korrelation der einzelnen Klüftmeßbereiche untereinander erkennt man verschiedene Zusammenhänge in den einzelnen Klüftbereichen (Fig.26).

Besonders deutlich tritt in allen vier Klüftbereichen die 70°-Richtung auf. Nur wenig schwächer sind die 20°, 45°-

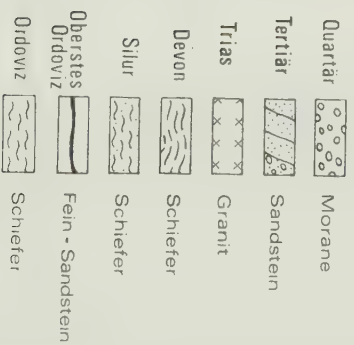
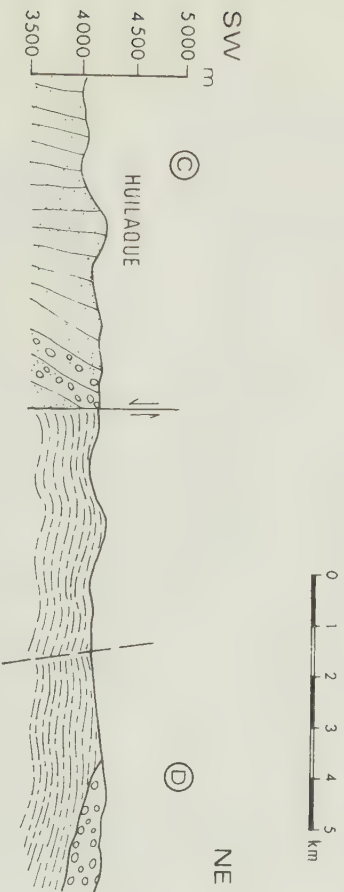
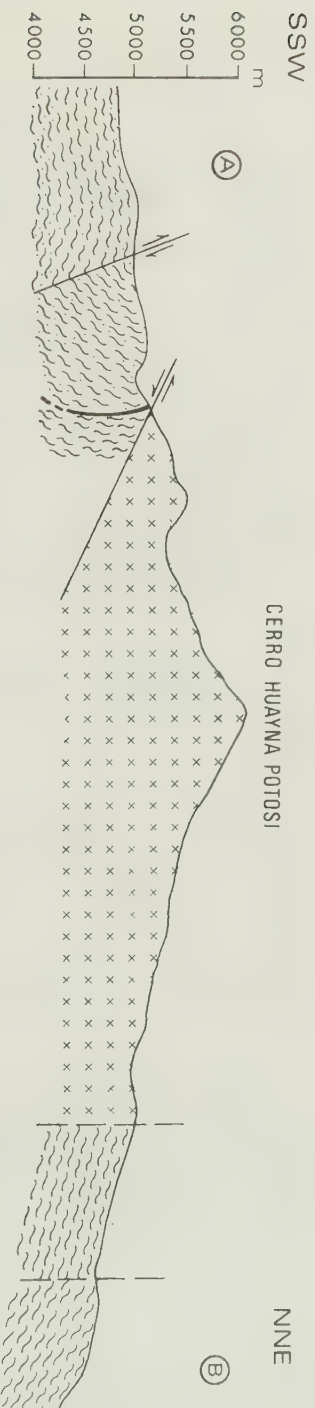


Fig.25: Schematische Querprofile durch die Gebiete Cerro Huayna Potosi (A-B) im N und Huilaque (C-D) im S des Arbeitsgebietes Huayna Potosi; Überhöhung 1:2.

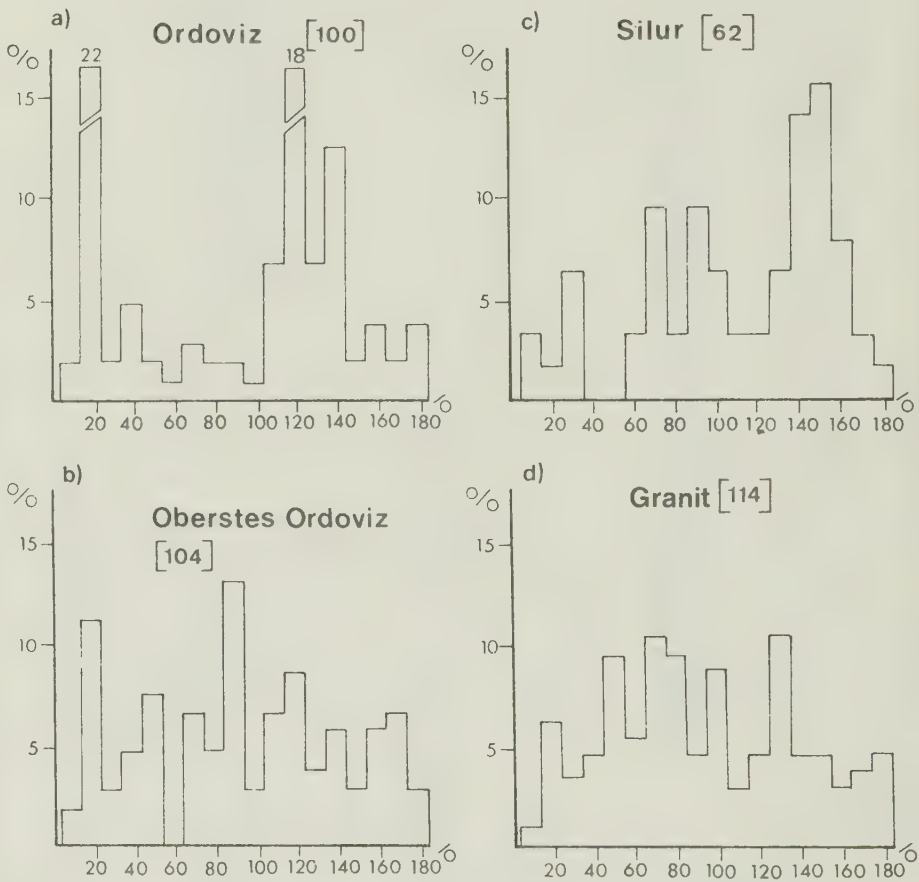


Fig.26: Richtungsverteilung der im Gelände gemessenen Klüfte im Gebiet Huayna Potosí. Aufgetragen sind die prozentualen Anzahlen pro Gradklasse und die Gesamtanzahl der Messungen.

und 140° -Richtungen ausgeprägt, wobei vor allem die Meßbereiche a-b-d Übereinstimmungen aufweisen.

Dagegen zeigen die Bereiche b-c ein Maximum in der E-W-Richtung, welches in den Graniten und den ordovizischen Sedimentiten nicht zu erkennen ist. Der Grund hierfür kann in der Überprägung der Ordoviz-Sedimentite durch den Granit gesucht werden.

Bei einer Betrachtung aller vier Kluftmeßbereiche beobachtet man eine starke Polarisierung in ein oder zwei Hauptmaxima in den Schiefern des Ordoviz und des Silur, während die härteren Gesteine des Granit und der Zapla-Formation eine Auffächerung ihrer Maxima-Richtungen zeigen. Hierin kann unter anderem die Ursache für die negative Korrelation der einzelnen Kluftbereiche untereinander liegen. Ein zweiter Grund liegt in der statistischen Methode selbst, da bei einem SPEARMAN Rang-Korrelations-Test immer die gesamte Verteilung und nicht nur die einzelnen Maxima verglichen werden. Bemerkenswert ist zudem noch das Fehlen der 0° -Richtung, da in den Luftbildern die Kluft- und Entwässerungsnetze Maxima in der N/S-Richtung aufweisen. Jedoch scheinen die im Luftbild gemessenen 0° -Klüfte überwiegend lang aushaltende Klüfte zu sein. Da im Gelände vorwiegend Kluftlängen im cm- bis m-Bereich gemessen wurden, ließen sich die lang aushaltenden Klüfte im Gelände nicht erfassen und tauchen daher nur untergeordnet in der Gelände-Kluftanalyse auf.

8.2.3. Photogeologische Ergebnisse

A) Kluftnetz

Um die im Luftbild gemessenen Klüfte mit denen im Gelände gemessenen vergleichen zu können, wurden die gleichen stratigraphischen Einheiten als Kluftmeßbereiche ausgewählt. Es wurden insgesamt 822 Klüfte gemessen. Sie verteilen sich auf die drei

Kluftmeßbereiche folgendermaßen (Fig.27):

- c) Granit : 248 Klüfte, $K=24,8/ D_K=10,2$ (km^{-2} bzw. km^{-1})
- b) Silur : 125 " , $K=1,3/ D_K=0,4$ (km^{-2} bzw. km^{-1})
- a) Ordoviz : 449 " , $K=15,2/ D_K=8,2$ (km^{-2} bzw. km^{-1})

Bei einem Vergleich der Kluftmeßbereiche anhand des SPEARMAN Rang-Korrelations-Tests beobachtet man eine Korrelation und vollkommene Übereinstimmung zwischen den Kluftbereichen: Granit-Ordoviz. Beide weisen jedoch mit dem Meßbereich b (Silur) keine Korrelation auf (Tab.4).

In den korrelierbaren Kluftbereichen a/c beobachtet man eine stark ausgeprägte N/S- und NW/SE-Richtung. Der Grund für die Korrelation zwischen den Kluftmeßbereichen des Ordoviz und des Granit liegt wahrscheinlich in der starken Überprägung der Ordovizklüfte durch die Granitklüfte. Diese Überprägung wurde durch die Überschiebung des sauren Plutons auf die paläozoischen Sedimentite hervorgerufen.

Der Kluftmeßbereich b (Silur) zeigt vor allem Kluftanhäufungen in den N/S-, NW/SE- und NE/SW-Richtungen. Damit tritt gegenüber den Meßbereichen a und c vor allem die NE/SW-Richtung hervor.

Der Vergleich der SPEARMAN Rang-Korrelationskoeffizienten zwischen den Anzahlverteilungen der Kluftnetze anhand der Luftbild- und Geländemessungen (Tab.5) zeigt in allen drei stratigraphischen Einheiten keine Korrelation der Kluftbereiche untereinander.

Bei der Überprüfung der im Gelände gemessenen Klüfte stellte sich heraus, daß die 20° -, 70° -, 90° - und 140° -Richtungen flach oder ziemlich flach einfallen. Da flach einfallende Klüfte im Luftbild nicht oder nur schwer erkennbar sind, werden ihre Streichrichtungen bei einer Kluftnetzanalyse unterbewertet (s.auch LIST, 1968). Die Richtungsmaxima der flach einfallenden Klüfte tauchen daher auch nicht als Maxima in der Kluftanalyse der im Luftbild gemessenen Klüfte auf. Diese Ursache erklärt das Fehlen jeglicher Korrelation zwischen den

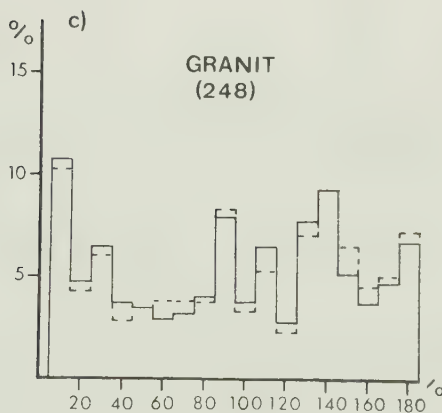
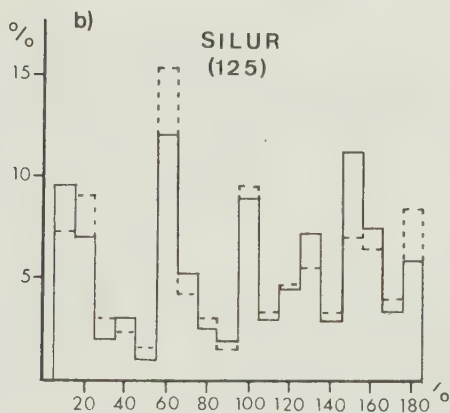
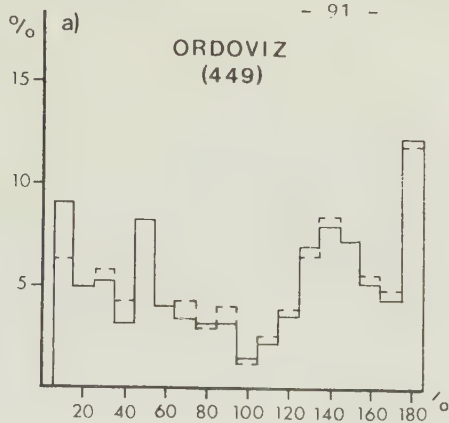


Fig. 27: Richtungsverteilung der im Luftbild gemessenen Klüfte im Gebiet Huayna Potosí. Aufgetragen sind die prozentualen Längen (durchgezogene Linie) und Anzahlen (gestrichelte Linie) pro Gradklasse und die Gesamtanzahl der Messungen.

im Luftbild und den im Gelände gemessenen Klüften.

Die K- und D_K -Werte lassen eine Abhängigkeit zur jeweiligen lithologischen Ausbildung der Kluftmeßbereiche erkennen. Die silurischen Schiefer mit ihrer geringen relativen Härte weisen Kleinklüfte auf, die im Luftbild nicht zu beobachten sind. Die wenigen Mittel- bzw. Großklüfte lassen nur geringe K- und D_K -Werte zu. Die harten Sedimentite des Ordoviz und die granitischen Intrusiva des Bearbeitungsgebietes zeigen vor allem eine intensive Ausbildung von Mittel- und Großklüften und damit sehr viel höhere K- und D_K -Werte.

B) Entwässerungsnetz

Zur Ermittlung des Entwässerungsnetzes im Gebiet Huayna Potosí wurden 12 Meßbereiche aus der Interpretationskarte ausgewählt. Dargestellt werden diese Meßbereiche anhand von Einheitskreisen mit einem Radius von 1 km. Die Einheitskreise verteilen sich wie folgt auf die verschiedenen stratigraphischen Einheiten (Fig.28):

f) Quartär:	3 (Kreis/-se);	55 (Anzahl der Messungen)	
e) Tertiär:	2 " ;	80	"
d) Devon:	1 " ;	74	"
c) Silur:	3 " ;	257	"
b) Ordoviz:	2 " ;	116	"
a) Granit:	1 " ;	47	"

Vergleicht man die Entwässerungsnetze im Luftbild anhand des SPEARMAN Rang-Korrelations-Tests (Tab.6), so ergibt sich nur in den Meßbereichen Tertiär/Quartär eine Korrelation, jedoch keine vollkommene Übereinstimmung, während alle anderen Meßbereiche keine Korrelation untereinander aufweisen.

Die Figuren 29a und 29b zeigen deutlich verschiedene Zusammenhänge in der Verteilung der Richtungsmaxima der sechs stratigraphischen Einheiten.

Die Entwässerungsnetze des Granit und der paläozoischen Sedimente weisen Maxima in der 0° -, 35° -, 65° -, 110° -, 140° -Rich-



Fig.28: Meßbereiche I-XII zur Ermittlung der Entwässerungsdichte (D_E) und der Richtungsverteilung der Entwässerungssegmente im Gebiet Huayna Potosí.

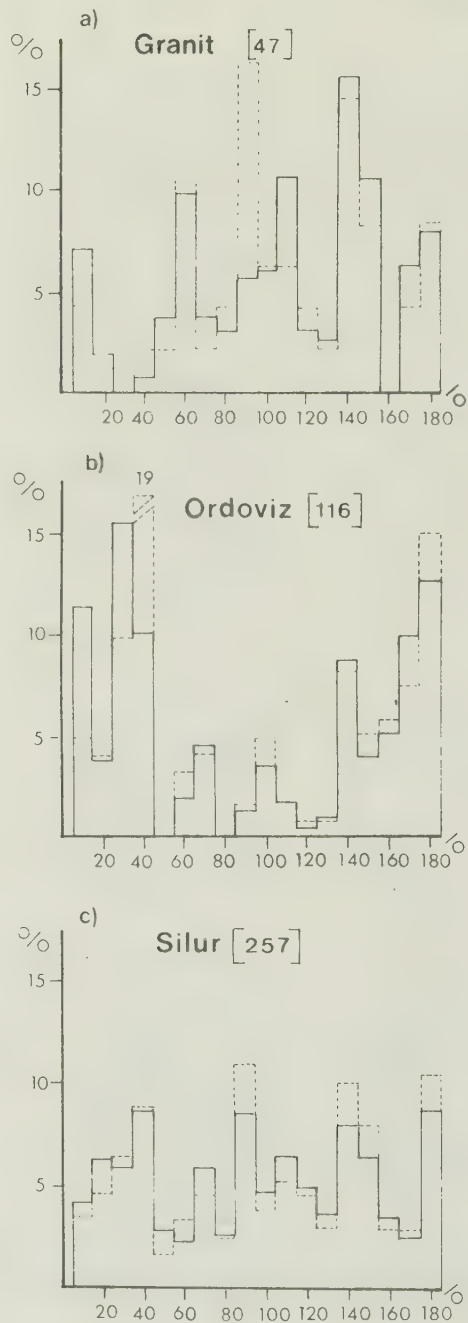


Fig. 20a: Richtungsverteilung der im Luftbild gemessenen Entwässerungssegmente im Gebiet Huayna Potosí. Aufgetragen sind die prozentualen Längen (durchgezogene Linie) und Anzahlen (gestrichelte Linie) pro Gradklasse und die Gesamtanzahl der Messungen.

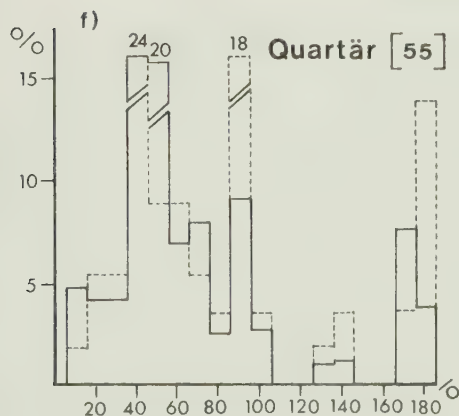
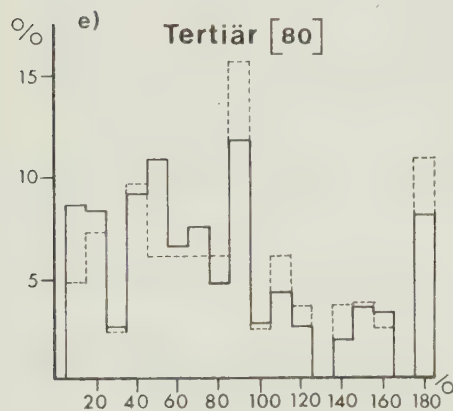
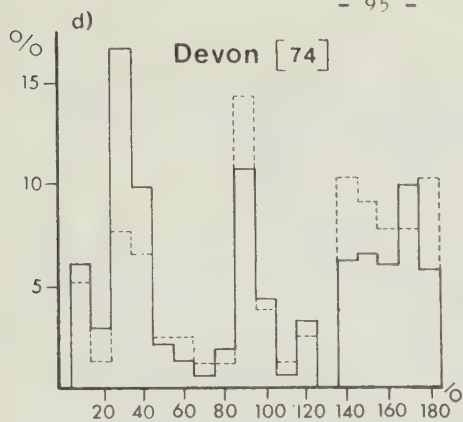


Fig. 29b: Richtungsverteilung der im Luftbild gemessenen Entwässerungssegmente im Gebiet Huayna Potosí. Aufgetragen sind die prozentualen Längen (durchgezogene Linie) und Anzahlen (gestrichelte Linie) pro Gradklasse und die Gesamtanzahl der Messungen.

tung auf. Ab Silur treten verstärkt die E-W-Richtungen auf, welche bis in das Quartär hinein zu verfolgen sind. Durchgehend durch alle sechs stratigraphischen Einheiten sind die NW-SE- und N-S-Richtungen.

Bei einem Vergleich der Kluft- und Entwässerungsnetze in ihren Längen- und Anzahlverteilungen durch den SPEARMAN Rang-Korrelations-Test im Gebiet Huayna Potosí ergibt sich keine Korrelation (Tab.7).

In der Tabelle 8 wurde ein Vergleich der Längen- und Anzahlverteilungen der Kluft- und Entwässerungsnetze anhand des SPEARMAN Rang-Korrelations-Tests und des Chi-Quadrat-Tests im Gebiet Huayna Potosí zusammengestellt. Man beobachtet durchgehend Korrelation, ja sogar vollständige Übereinstimmung untereinander. Allein die quartären Moränensedimente weisen keine Korrelation zwischen der Längen- und Anzahlverteilung auf, da ihr Entwässerungsnetz bedingt durch seine junge Ausbildung eine parallele bis subparallele Form zeigt.

Anhand der Tabelle 9 erkennt man große Schwankungen der Entwässerungsdichten innerhalb der sechs verschiedenen Meßbereiche.

Die silurischen Schiefer weisen aufgrund ihrer lithologischen Ausbildung (s.a. KRONBERG, 1967b) die höchsten D_E -Werte im Bearbeitungsgebiet auf. Nur einen wenig geringeren D_E -Wert zeigen die devonischen Feinsandsteine.

Eine sehr geringe Entwässerungsdichte lassen dagegen die grobkörnigen Sandsteine des Tertiärs erkennen. Den geringsten D_F -Wert kann man in dem noch jungen und unausgereiften Entwässerungssystem in den quartären Moränensedimenten beobachten.

Auch die parallele bis subparallele Entwässerungsform in diesen Sedimenten weist auf ein noch nicht ausgereiftes Entwässerungsnetz hin. Dagegen ist die subparallele Form des ordovizischen Entwässerungssystems auf die steile Hangexposition zurückzuführen, auf der es sich ausgebildet hat.

Tabelle 3: Vergleich der Kluftmeßbereiche der im Gelände gemessenen Klüfte (Kl/ge) mit dem SPEARMAN Rang-Korrelations-Test (R_s) im Gebiet Huayna Potosí
($R_s = 0,399$ bei $\alpha = 0,05$)

Vergleich	R_s	Art	Lithologie
Ordoviz- Trias	-0,5370	Kl/ge	Schiefer-Granit
Ordoviz-Oberstes Ordoviz	-0,4830	Kl/ge	Schiefer-Feinsdst.
Oberstes Ordoviz-Silur	-0,7191	Kl/ge	Feinsdst.-Schiefer

Tabelle 4: Vergleich der Kluftmeßbereiche der im Luftbild gemessenen Klüfte (Kl/lu) mit dem SPEARMAN Rang-Korrelations-Test (R_s) und dem Chi-Quadrat-Test (χ^2/A und χ^2/L) im Gebiet Huayna Potosí
($R_s = 0,399$ bei $\alpha = 0,05$ / $\chi^2 = 27,6$ bei $\alpha = 0,01$)

Vergleich	R_s	χ^2/A	χ^2/L	Art	Lithologie
Ordoviz- Trias	0,6626	23,2	22,3	Kl/lu	Schiefer-Granit
Ordoviz-Silur	0,1314	89,7	75,0	Kl/lu	Schiefer-Schiefer
Tertiär-Silur	0,1118	64,2	70,5	Kl/lu	Granit-Schiefer

Tabelle 5: Vergleich der Anzahlverteilungen der im Gelände (Kl/ge) und im Luftbild (Kl/lu) gemessenen Kluftnetze mit dem SPEARMAN Rang-Korrelationstest (R_s) im Gebiet Huayna Potosí
($R_s = 0,399$ bei $\alpha = 0,05$)

Vergleich	R_s	Art	Stratigraphie	Lithologie
Kl/ge-Kl/lu	-0,0246	Anzahl	Trias	Granit
Kl/ge-Kl/lu	-0,8229	Anzahl	Silur	Schiefer
Kl/ge-Kl/lu	-0,2583	Anzahl	Ordoviz	Schiefer

Tabelle 6: Vergleich der Entwässerungsbereiche im Luftbild mit dem SPEARMAN Rang-Korrelations-Test (R_s) im Gebiet Huayna Potosí
($R_s = 0,399$ bei $\alpha = 0,05$)

Vergleich	R_s	Art	Lithologie
Ordoviz-Trias	-0,7127	Entw.	Schiefer-Granit
Ordoviz-Silur	-0,0232	Entw.	Schiefer-Schiefer
Silur-Trias	-0,2895	Entw.	Schiefer-Granit
Devon-Tertiär	-0,0905	Entw.	Feinsdst.-Sandst.
Tertiär-Quartär	0,4773	Entw.	Sandst.-Lockersed.

Tabelle 7: Vergleich der Kluft- und Entwässerungsnetze in ihren Längen- und Anzahlverteilungen mit dem SPEARMAN Rang-Korrelations-Test (R_s) im Gebiet Huayna Potosí
($R_s = 0,399$ bei $\alpha = 0,05$)

Vergleich	R_s	Art	Stratigraphie	Lithologie
Entw./Kluft	-0,1968	Länge	Trias	Granit
Entw./Kluft	-0,9566	Länge	Tertiär	Sandst.
Entw./Kluft	-0,0158	Länge	Silur	Schiefer
Entw./Kluft	-0,0955	Länge	Ordoviz	Schiefer
Entw./Kluft	-0,0970	Anzahl	Trias	Granit
Entw./Kluft	-0,4529	Anzahl	Tertiär	Sandst.
Entw./Kluft	-0,3003	Anzahl	Silur	Schiefer
Entw./Kluft	-0,2246	Anzahl	Ordoviz	Schiefer

Tabelle 8: Vergleich der Längen- und Anzahlverteilungen (L/A) der Kluft- und Entwässerungsnetze mit dem SPEARMAN Rang-Korrelations-Test (R_s) und dem Chi-Quadrat-Test (χ^2/A und χ^2/L) im Gebiet Huayna Potosí ($R_s = 0,399$ bei $\alpha = 0,05$ / $\chi^2 = 27,6$ bei $\alpha = 0,01$)

Vergleich	R_s	χ^2/A	χ^2/L	Art	Stratigraphie	Lithologie
L/A	0,9774	1,8	1,6	Kluft	Trias	Granit
L/A	0,7936	8,8	10,3	Kluft	Tertiär	Sandstein
L/A	0,8300	7,4	7,7	Kluft	Silur	Schiefer
L/A	0,9680	1,8	1,6	Kluft	Ordoviz	Schiefer
L/A	-0,3527	-	-	Entw.	Quartär	Moräne
L/A	0,4639	19,2	31,7	Entw.	Trias	Granit
L/A	0,7584	11,7	10,4	Entw.	Tertiär	Sandstein
L/A	0,4664	23,2	19,7	Entw.	Devon	Feinsdst.
L/A	0,9115	5,2	4,9	Entw.	Silur	Schiefer
L/A	0,4921	18,4	15,8	Entw.	Ordoviz	Schiefer

Tabelle 9: Entwässerungsparameter im Gebiet Hayna Potosí

Meßber.	Einheit	Untergrund	Form	D_E	Richtungsmaxima
I - III	Quartär	Lockerse- dimente	parallel- subparallel	3,01	40/70/90/-/140/180/
IV - V	Tertiär	Sandstein	subparallal- subdendrit.	4,42	45/70/90/110/145/180
VI	Devon	Feinsdst.	subdendrit.	7,00	30/-/90/120/140/180,
VII -IX	Silur	Schiefer	subparallel	7,49	40/70/90/110/140/180
X - XI	Ordoviz	Schiefer	subparallel	6,24	40/70/-/100/140/180/
XII	Trias	Granit	subparallel- subdendrit.	6,56	-/60/90/110/140/180

8.3. Gebiet APOLLO

8.3.1. Lithologie

Umfassende Arbeiten über das Gebiet Apolo liegen bis heute nicht vor. Jedoch kann man in verschiedenen Arbeiten Einzelprobleme dieser Region behandelt finden. So haben sich BULLMAN (1931) und BRANISA (1969) mit der in der Umgebung von Apolo gefundenen ordovizischen Fauna auseinandergesetzt. CAVEDO REYES (1960), PERRY (1963) und FREYDANK (1964, 1966) behandeln allgemein geologische Fragen, ebenso wie OPPENHEIM (1943). MONHEIM (1965) und PEÑARANDA (1972) befaßten sich mit antropogeographischen Problemen in diesem Raum.

Folgende lithologische Einheiten konnten im Gebiet Apolo aus-
geschieden werden (Fig.30):

- d) Lockersedimente (Quartär)
- c) Beu-Bala-Sandstein (Kreide)
- b) Tequeje-Schiefer, -Sandstein (Devon)
- a) Apolo-Schiefer (Ordoviz)

8.3.1.a) Apolo-Schiefer (Ordoviz)

Das älteste bekannte Schichtglied im Bearbeitungsgebiet sind die geschieferten Feinsandsteine des Ordoviz, im folgenden Apolo-Schiefer genannt.

Diese Schichten stehen im Tal von Apolo an. Sie zeigen eine mittel- bis hellbraune Farbe, jedoch kann man in engbegrenzten Teilbereichen starke Farbwechsel erkennen (z.B. graugrün, hell- bis dunkelgrau, hellgelb, schwarz, etc.).

Die Schiefer sind wenig erosionsresistent und verwittern zu kleinen, meist länglichen Stengeln (Griffelschiefer), die 2-20 mm lang sein können. Der Bruch ist eckig-muschelig. Die Korngröße ist mit dem Auge nicht zu erkennen.

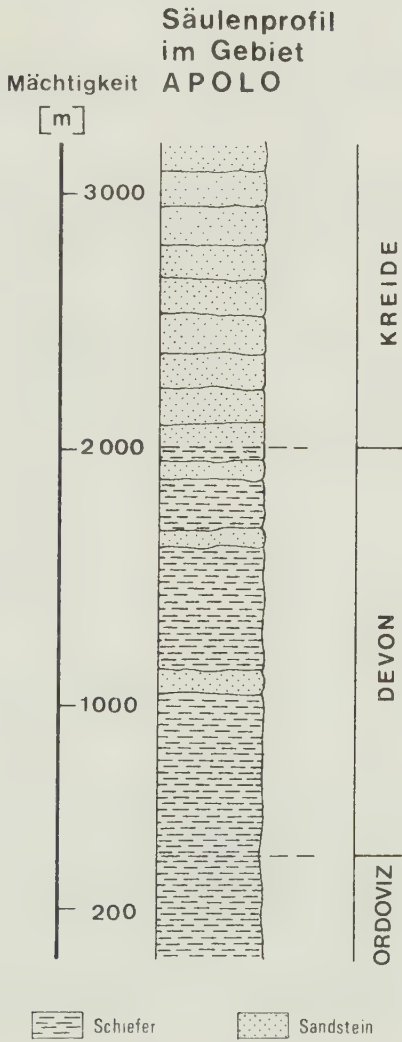


Fig. 30

Die Oberfläche der Apolo-Schiefer ist oft mit limonithaltigen Verkrustungen überzogen.

Im Gegensatz zu den Devon-Schiefen sind die ordovizischen Schiefer nicht oder nur kaum mit Flechten überwachsen.

Die Schiefer lassen Bänderung erkennen. Der Abstand der Schieferungsflächen liegt bei 2-20 mm, während die Bankmächtigkeit zwischen 10 cm und 30 cm schwankt.

Im Dünnschliff sind gut klassierte (0,1-0,2 mm), angulare bis subgerundete Quarzkörner zu erkennen. Die Packungsdichte ist unterschiedlich. Hohe Packungsdichten mit wenig Zement wechseln ab mit zementreichen Partien geringerer Packungsdichte. Im Zement überwiegt der Limonit, der z.T. durch Konkretionen angereichert ist. Die Quarzkörner weisen manchmal eine randliche Verdrängung durch Limonitsubstanz auf und sind reich an Flüssigkeits-Gas-Einschlüssen (pegmatitischer Quarz). Ebenso beobachtet man limonitische Sphäroide bzw. Ooide um Einschlüsse wie Quarz, Turmalin, Zirkon und opaken Gemengteilen.

Folgende Ordoviz-Fossilien wurden von PONCE (schriftl.Mitt.) gefunden und von BRANISA (schriftl.Mitt.) bestimmt:

- Trilobiten-Fragmente (Asaphidae ?)
- Gastropoden-Fragmente (Bellerophonitidae)
- Orthoceras-Fragmente
- Brachiopoden-Fragmente (Resserella, Bancroft 1928)

Alle aufgeführten Fossilfragmente weisen nach BRANISA (schriftl. Mitt.) auf tieferes bis mittleres Ordoviz hin. Außerdem erkennt man in den Schiefen typische "Cone-in-Cone"-Strukturen, die BRANISA (schriftl.Mitt.) der Formation Obispo (Arenig-tiefes Llanvirn) der tieferen altpaläozoischen Schichten Süd-bolivians zurechnet.

Die Sedimente wurden wahrscheinlich in geringen Meerestiefen ruhig abgelagert.

Den Schiefer durchziehen gut erkennbare, meist langanhaltende Klüfte (Abb.19). Die Kluftflächen können gekrümmt sein. Sie sind entweder mit sekundärem Quarz wieder verfüllt, der bis zu 20 mm mächtige Bänder bildet, oder mit toniger Substanz ausgelegt, die bis zu 2 mm mächtig werden kann.

Die Apolo-Schiefer sind z.T. gefaltet, wobei die Spannweite der Falten im dm- und m-Bereich liegt. Insgesamt liegen die ordovizischen Schichten subhorizontal.

Die Mächtigkeit der ordovizischen Apolo-Schiefer im Untersuchungsgebiet war nicht zu ermitteln, da die Aufschlüsse nur geringmächtige Anschnitte zeigen.

Im Luftbild lassen sich die ordovizischen Sedimentite anhand verschiedener charakteristischer Unterscheidungsmerkmale von den angrenzenden devonischen und kretazischen Serien trennen:

- 1.) lithologische Ausbildung: Schiefer
- 2.) Homogenität : einheitlich
- 3.) Oberflächenstruktur : glatt, leicht gewellt
- 4.) relative Härte : weich
- 5.) Grauwert : 2 - 5
- 6.) Klüftung : Kleinklüfte, wenige Großklüfte
- 7.) Klüftigkeit (K) : $1,8 \text{ km}^{-2}$
- 8.) Kluftdichte (D_K) : $0,9 \text{ km}^{-1}$
- 9.) Entwässerungsform : subdendritisch
- 10.) Entwässerungsdichte (D_E): $5,41 \text{ km}^{-1}$

Vergleicht man diese aus dem Luftbild gewonnenen Parameter mit denen der devonischen und kretazischen Serien im Untersuchungsgebiet, so lassen sich gut einige Unterscheidungsmerkmale erkennen. Auf der 20-stufigen Grauwertskala weisen die ordovizischen Schichten die geringsten Werte auf, d.h. sie besitzen die höchste Albedo in diesem Gebiet. Auch die flachen, weichen, leicht gewellten morphologischen Formen, die geringe Klüftigkeit und Kluftdichte, sowie die Kleinklüftung

sind als typische Unterscheidungsparameter gegenüber den angrenzenden geologischen Serien anzusehen. Die Entwässerungsdichte unterscheidet sich dagegen nur unwesentlich von der der kretazischen Sandsteine, jedoch stark von der der devonischen Schichten.

Die geringe Klüftigkeit und Kluftdichte ist auf die Kleinklüftung der ordovizischen Schiefer zurückzuführen, da die Kleinklüftung im Luftbild nicht zu erfassen ist und deshalb bei einer statistischen Auswertung vernachlässigt werden muß.

8.3.1.b) Tequeje-Schiefer, -Sandstein (Devon)

Als nächstjüngere lithologische Einheit folgen auf die ordovizischen Sedimentite die devonischen Tequeje-Schichten.

Sie sind ausschließlich im SW des Gebietes Apolo zu finden und bilden die SW-Flanken des Tales von Apolo.

Es handelt sich hier um eine Sandstein-Tonschiefer-Folge, die in ihren höheren Teilen eine Verstärkung der Sandstein-Komponente aufweist, während in ihren tieferen Partien die Tonschiefer-Komponente überwiegt.

Die Tonschiefer zeigen einen starken Farbwechsel von hellgelb und -grau bis zu mittelgrau und dunkelbraun. Die Schiefer verwittern gemäß ihrer Faziesausbildung sehr gut zu kleinen Bröckchen. Die Bankmächtigkeiten bewegen sich im cm- und dm-Bereich, wobei die mittlere Bankmächtigkeit bei ca. 5 cm liegt.

Unter dem Mikroskop zeigen die Tonschiefer ein verzahntes Quarzkorngemenge aus ungleich gestaltigen Körnern, die eine ziemlich gute Klassierung (0,05-0,2 mm) aufweisen und subangular bis subgerundet sind. Auf den Korngrenzen haben sich Mikrokristalle gebildet und zonenweise treten Limonitfilme

auf. Die Quarze sind pegmatitischen Ursprungs und löschen nur wenig undulös aus. Die Matrix zeigt viel feindetritisches Material und neben Turmalin- und Zirkonkristallen erkennt man Glimmer, Limonitkörner und opake Gemengteile.

In der Übergangszone zwischen den mengenmäßig überwiegenden Tonschiefern im tieferen Teil der Tequeje-Schichten und den dominierenden Sandsteinen in den höheren Partien verstärken sich die Limonitbeimengungen. Sie treten meist als Spaltenfüllungen von Klüften auf (Abb.20), zeigen sich jedoch auch in Form von Limonitüberzügen und -konkretionen.

In dieser Übergangszone weisen die Quarzkörner unter dem Mikroskop eine schlechte Klassierung (0,04-0,4 mm) auf. Sie sind in der limonitischen Matrix sehr locker gepackt, wobei die großen Körner generell eckiger (subangular) ausfallen. In der limonitischen Grundmasse erkennt man schalig aufgebaute Sphäroid-Strukturen mit teilweiser Aggregatpolarisation, die vermutlich durch Kristallneubildung hervorgerufen wurde. Neben den Quarzkörnern finden sich noch Strähnen von klastischem Muskowit, gut gerundeter Zirkon, Turmalin und opake Gemengteile, die wahrscheinlich Bruchstücke aufgearbeiteter Hämatit-Limonit-Lagen sind.

Die in den höheren Teilen der Tequeje-Schichten dominierenden Sandsteine zeigen im verwitterten Zustand eine mittel- bis dunkelbraune Farbe. Im frischen Anschlag sehen sie hellbraun aus. Der Bruch weist mittellunde bis runde Kanten auf und die Körnung ist mit dem Auge noch zu erkennen. Zudem sind in den tieferen Teilen der Sandsteinserien insgesamt hellere Farben als in den höheren Partien derselben zu beobachten.

Die Sandsteine weisen im tieferen Teil der Sandsteinserien eine Bankmächtigkeit von 5-20 cm auf, während sie in den höheren Teilen Bankmächtigkeiten zwischen 30 cm und 100 cm annehmen können (Abb.21).

Die Sandsteine verwittern zu kleinen Stücken und Blöcken. Einzelne Verwitterungsrinnen sind zu erkennen, jedoch ist der

Sandstein insgesamt verwitterungsresistenter als der ordovizische Schiefer, was auch durch den geringeren Anfall an Verwitterungsschutt dokumentiert wird.

Die Ausbisse der Sandsteinserien sind z.T. überzogen von mittel- bis dunkelbraunen Flechten.

Unter dem Mikroskop erkennt man innerhalb der extrem dicht gepackten Quarzkörner eine sehr gute Klassierung (0,1-0,2 mm). Die Körner sind subangular bis subgerundet und ihre Korngrenzen berühren sich über limonitische Granularfilme mit Mikrokristallen. Neben den Quarzkörnern findet man noch fast idiomorphe bis deutlich gerundete Zirkon- und Turmalinkristalle (Abb.22).

In den Tequeje-Schichten wurde von PONCE (schriftl.Mitt.) ein bestimmbares Fossil gefunden. Dabei handelt es sich nach BRANISA (schriftl.Mitt.) um:

Australocoelia cf. *tourteloti* (GILL & BONCOT) -- tieferes Devon

Die Sedimente des Devon wurden wahrscheinlich in geringen Meerestiefen ruhig abgelagert. Jedoch endet mit dem Herausheben des andinen Ablagerungsraumes im Laufe des Devons der altpaläozoische Sedimentationszyklus, so daß in den höheren Partien des Devons kontinental-klastische Ablagerungen auftreten.

In den Tequeje-Schichten, vor allem jedoch in den höheren Sandsteinserien ist eine gut ausgebildete Mittel- bis Großklüftung zu erkennen, wobei die Klüfte sich bis zu 5 cm öffnen können und zumeist mit Quarz belegt sind.

Die devonischen Serien fallen steil bis überkippt nach SSW bzw. NNE ein. Lang durchhaltende Störungen teilen die Sandsteinhügel in einzelne Blöcke, die gegeneinander verkippt sind.

Die aufgeschlossene Mächtigkeit der Tequeje-Schichten dürfte im Bearbeitungsgebiet ca. 1600 m nicht übersteigen.

Die devonischen Sedimentgesteine weisen ebenfalls im Luftbild verschiedene charakteristische Parameter auf, die es erlauben, diese Schichten von den beiden anderen lithologischen Einheiten im Gebiet zu unterscheiden:

- 1.) lithologische Ausbildung: Wechsellagerung Schiefer/Sandst.
- 2.) Homogenität : durch Materialwechsel schwach einheitlich
- 3.) Oberflächenstruktur : sandig-rauh, intensive Zertalung
- 4.) relative Härte : wechselnd, insgesamt ziemlich weich
- 5.) Grauwert : 6 - 8
- 6.) Klüftung : Mittel- bis Großklüfte
- 7.) Klüftigkeit (K) : $3,0 \text{ km}^{-2}$
- 8.) Kluftdichte (D_K) : $1,4 \text{ km}^{-1}$
- 9.) Entwässerungsform : subparallel-subdendritisch
- 10.) Entwässerungsdichte (D_E): $7,02 \text{ km}^{-1}$

Die devonischen Sedimentite weisen im Luftbild gegenüber den anderen Gesteinen die höchste Entwässerungsdichte, Klüftigkeit, Kluftdichte und den höchsten Grauwert (=geringste Albedo) auf. Die lithologische Ausbildung dieser Schichten mit einer Wechsellagerung von Schiefer-Sandstein, die durch diesen Materialwechsel bedingte schwach einheitliche Homogenität und die daraus resultierende intensive Zertalung haben einen entscheidenden Einfluß auf die Entwässerungs- und Kluftparameter.

Die devonischen Schichten sind darüber hinaus auch im Luftbild durch ihren Wechsel von morphologisch weichen Formen (Schiefer-Komponente) und langaushaltenden Sandsteinbänken, die sich in den morphologisch härteren Formen ausbilden, gekennzeichnet.

8.3.1.c) Beu-Bala-Sandstein (Kreide)

Die devonischen Serien werden im Gebiet Apolo vom Beu-Bala-Sandstein der Kreide überlagert.

Die Sandsteine bilden die steilen, schroffen Bergketten des Altuncama im NE des Bearbeitungsgebietes (Abb.23).

Sie zeigen eine hell- bis dunkelbraune, z.T. rötliche Farbe, sind erosionsresistent und lassen keine Schichtung erkennen. Das Gestein ist ziemlich grobkörnig und bröckelig. Der Verwitterungsschutt zeigt Brocken von verschiedener Größe, ist aber in seiner Gesamtmenge nicht beträchtlich. Die Bankmächtigkeiten schwanken zwischen 30 cm und 3 m.

Im Dünnschliff erkennt man dicht gepackte, eckig-subgerundete, in seltenen Fällen auch gerundete Quarzkörner, die eine unterschiedliche Größe besitzen und z.T. deutlich mit ihrer Längsachse eingeregelt sind. Die Quarze zeigen z.T. ein nachträgliches Weiterwachsen über die ursprünglichen Korngrenzen hinaus. Die auskristallisierten Säume sind kristallographisch orientiert aufgewachsen. Die Grenzen des sedimentären Kornes sind durch Limonit-Filme im Zement gekennzeichnet. Man beobachtet überwiegend deutlich längliche Bruchstücke von Quarzkörnern, die nur geringe Sphärität aufweisen. Eine noch bessere Einregelung als die Quarzkörner zeigen z.T. die klastischen Muskowitsträhnen im ss. Neben der limonitischen Matrix beobachtet man noch viel mylonitisierten Quarz, Turmalin- und Zirkonkristalle und z.T. Quarz mit Deformationsbänderung (Böhm'sche Streifung).

Fossilfunde sind dem Verfasser aus dem kretazischen Beu-Bala-Sandstein des Altuncama nicht bekannt. Aus einem Vergleich der Lithologie läßt sich jedoch der Schluß ziehen, daß die Sandsteine des Altuncama-Höhenzuges das Äquivalent zu den kretazischen Beu-Bala-Sandsteinen der nördlichen subandinen Zone darstellen. Aus diesem Grund wurde für sie ebenfalls die Bezeichnung Beu-Bala-Sandstein gewählt.

Die Sedimente der Kreide wurden in geringen Meerestiefen im nahen Küstenbereich ruhig abgelagert.

Die kretazischen Serien formen im Bearbeitungsgebiet eine schwach ausgebildete Synklinale und fallen mit bis zu 30° nach NE bzw. SW ein.

Eine gut erkennbare und tiefgreifende Klüftung im m- bis 100m-Bereich durchzieht den Ben-Bala-Sandstein, wobei sich die Klüfte bis zu mehreren Zentimetern öffnen können und zu- meist mit Quarz belegt sind.

Die aufgeschlossene Mächtigkeit der kretazischen Serien im Bearbeitungsgebiet beträgt ca. 800 m.

Auch die kretazischen Sandsteine weisen im Luftbild typische Unterscheidungsmerkmale gegenüber den beiden anderen lithologischen Einheiten im Bearbeitungsgebiet auf:

- 1.) lithologische Ausbildung: Sandstein
- 2.) Homogenität : einheitlich
- 3.) Oberflächenstruktur : z.T.sandig-rauh, z.T.massig
- 4.) relative Härte : ziemlich hart
- 5.) Grauwert : 3 - 7
- 6.) Klüftung : Mittel- bis Großklüfte
- 7.) Klüftigkeit (K) : $2,3 \text{ km}^{-2}$
- 8.) Kluftdichte (D_K) : $1,2 \text{ km}^{-1}$
- 9.) Entwässerungsform : subparallel
- 10.) Entwässerungsdichte (D_E): $5,20 \text{ km}^{-1}$

Im Luftbild sind besonders die kretazischen Sedimentgesteine durch ihre kompakten, morphologisch positiven Formen gut zu interpretieren. Im Gegensatz zu den Serien der Kreide lassen die ordovizischen Schichten im Tal von Apolo flache, leicht gewellte morphologische Formen erkennen. Die devonischen Sedimentite unterscheiden sich vor allem von den kretazischen Schichten durch ihre starke Zertalung und durch ihren Wechsel von morphologisch härteren und morphologisch weicheren Formen.

Dagegen weist der Grauwert keine markanten Unterschiede auf. Auch die fehlende Waldbedeckung ist bei allen drei lithologischen Einheiten zu beobachten.

8.3.1.d) Lockersedimente (Quartär)

Die Lockersedimente des Quartär findet man in den westlichen und südlichen Bereichen des Bearbeitungsgebietes in geringer Verbreitung. Durch eine fast geschlossene Grasdecke (s.Kap.7.3.) sind sie im Luftbild nur indirekt anhand bestimmter Kriterien wie Oberflächenstruktur, typische Lage und Grauton zu erkennen und zu klassifizieren.

Im Luftbild lassen sich drei verschiedenartige Lockersedimenttypen unterscheiden:

- 1.) fluviatile Terrassen
- 2.) Sturz- und Schwemmkegel
- 3.) Sumpf, Moor

Fluviatile Terrassen werden im Gebiet Apolo nur durch den Fluß Turiapo gebildet und begrenzen im SW und W das Bearbeitungsgebiet. Die geschlossene Grasbedeckung zeigt, daß die Bildung der Terrassen z.T. unterbrochen bzw. abgeschlossen ist.

Frische, d.h. unbewachsene Sturz- und Schwemmkegel konnten im Bearbeitungsgebiet nicht beobachtet werden. Nur an der Südseite der Santa-Catalina-Hügelkette wurden bewachsene, d.h. nicht rezente Sturz- und Schwemmkegel mit quantitativ geringem Vorkommen erkannt.

Ein flächenhaft wenig ausgedehntes Moor- bzw. Sumpfgebiet befindet sich im S des Gebietes Apolo. Man erkennt es anhand seines gegenüber der Umgebung viel dunkleren Grautones.

8.3.2. Tektonik

Die subandine Zone, in deren Region das Gebiet Apolo und Teile des Gebietes Rurrenabaque liegen, schaltet sich im N Boliviens zwischen Andenblock und brasilianischen Kraton.

Sie unterscheidet sich nicht allein morphologisch und stratigraphisch, sondern auch tektonisch grundlegend vom Andenblock.

Über die Tektonik der subandinen Zone gibt es nur wenige Arbeiten, so z.B. von AHLFELD (1970), CASTAÑOS (1972), LOPEZ-MURILLO (1967), PLAFKER (1962, 1964) und SONNENBERG (1961, 1963).

Die subandine Zone zerfällt der Breite nach in einen westlichen, gebirgigen und einen östlichen, im Flachland gelegenen Abschnitt. In der Streichrichtung der Anden unterscheidet man ebenfalls drei Abschnitte, einen nördlichen, mittleren und südlichen Abschnitt, wobei der nördliche und südliche Streifen ähnlich gebaut sind.

Das Gebiet Apolo befindet sich im westlichen, gebirgigen Abschnitt (Höhen zwischen 1000 m und 2500 m) der nördlichen subandinen Zone. Nach SONNENBERG (1963) und AHLFELD (1970) ist diese nördliche Einheit durch einen Wechsel von schmalen, scharfen, asymmetrischen Sätteln und breiten Mulden (intramontanen Längstälern) gekennzeichnet. Im Vergleich zur Tektonik des Andenblockes ist die Faltung wesentlich schärfer. Sie klingt jedoch nach E hin ab. Ostvergente Aufschiebungen fallen im W steil, gegen E zu flacher ein.

Die Hauptfaltungsphase der subandinen Zone steht in enger zeitlicher Beziehung zur Haupthebungsphase des Andenblockes im Pliozän. An der Wende Pliozän/Pleistozän ist die subandine Zone als letzte andine Einheit gehoben worden.

Wie das Querprofil (Fig.31) zeigt, prägen falten- und bruchtektonische Elemente den geologischen Bau dieses Gebietes. Nach AHLFELD (1946) handelt es sich um ältere Rumpfflächen, die entlang von gebirgsp parallelen Verwerfungen unterschiedlich stark gehoben wurden. Schon AHLFELD (1946) verzeichnet in seiner geologischen Karte von Bolivien östlich von Apolo eine langhinziehende Verwerfungslinie, an der die kretazischen Sandsteine des Altuncama-Höhenrückens über die im Tal von Apolo anstehenden ordovizischen Schiefer herausgehoben wurden.

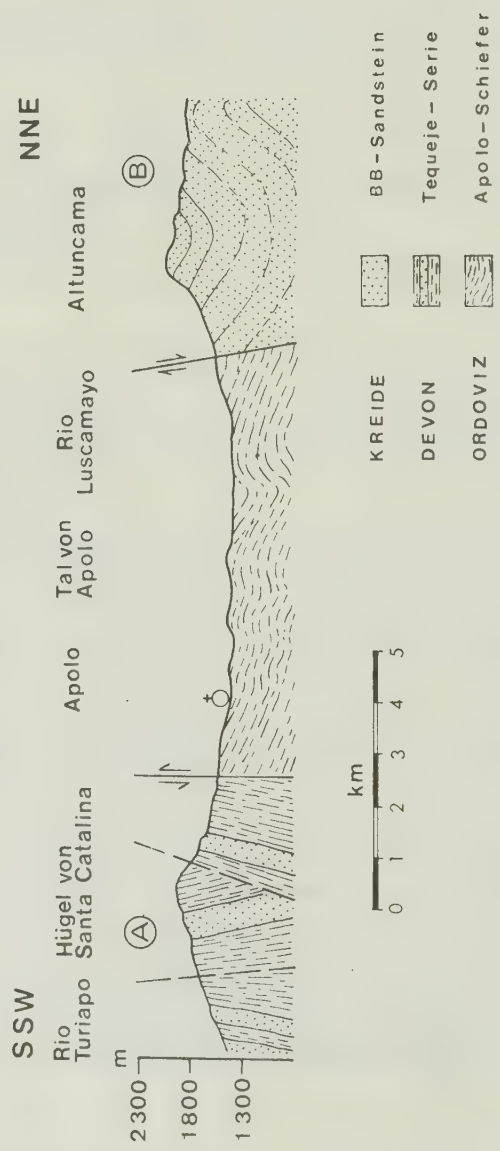


Fig. 31: Schematisches Querprofil durch das Arbeitsgebiet Apolo;
(Überhöhung 1:2)

Diese tiefgreifenden Verwerfungslinien trennen die diskordant aufeinanderfolgenden Sedimentgesteine des Ordoviz, des Devons und der Kreide.

Die fast saiger einfallenden Schichten des Devons im SW des Bearbeitungsgebietes sind durch lang durchhaltende Störungen in sich stark zerschert und entlang dieser Störungen auf- und/oder abgeschoben worden. Dagegen zeigen die ordovizischen Schiefer im Tal von Apolo keine bruchtektonischen Elemente, sondern eine ausgeprägte Kleinfaltung im dm- bis m-Bereich. Die gesamten Sedimentgesteine des Ordoviz liegen mehr oder weniger horizontal bis subhorizontal.

Auch der geologische Bau des Altuncama-Höhenrückens im NE des Gebietes weist eindeutig faltentektonische Elemente auf. Bedingt durch die dickbankigen kretazischen Sandsteine bildeten sich hier weitgespannte Falten aus.

Die im Gelände gemessenen Klufrichtungen weisen bestimmte, vorherrschende Streichrichtungen auf. Es sind dies die Richtungen N-S (steil einfallend), NE-SW (flach einfallend), NW-SE (steil einfallend) und dazu die Richtungen 65° (flacher einfallend) und 120° (steiler einfallend). Mit den im Luftbild gemessenen Klufrichtungen sind die im Gelände erkannten Streichrichtungen nicht identisch, jedoch gut korrelierbar.

8.3.3. Photogeologische Ergebnisse

A) Kluftnetz

Analog dem Gebiet Huayna Potosí wurden auch aus den Luftbildern des Bearbeitungsgebietes Apolo alle erkennbaren Klüfte in die Interpretationskarte dieser Region eingetragen und zur weiteren statistischen Auswertung herangezogen.

Es wurden im gesamten Gebiet 746 Klüfte eingemessen, die sich folgendermaßen auf die drei stratigraphischen Einheiten verteilen (Fig.32):

- a) Kreide : 282 Klüfte, $K=2,3$ / $D_K=1,2$ (km^{-2} bzw. km^{-1})
- b) Devon : 112 Klüfte, $K=3,0$ / $D_K=1,4$ (km^{-2} bzw. km^{-1})
- c) Ordoviz : 352 Klüfte, $K=1,8$ / $D_K=0,9$ (km^{-2} bzw. km^{-1})

Betrachtet man die Verteilung der Kluftazimute, so zeigt sich im großen und ganzen eine ähnliche Ausbildung der Maxima. Anhand der Tabelle 10 erkennt man, daß die Kluftmeßbereiche Ordoviz und Devon untereinander korrelierbar sind, jedoch keine vollkommene Übereinstimmung besitzen. Dagegen ist bei einem Vergleich der Meßbereiche Devon und Kreide keine Korrelation zu erkennen.

Die Verteilungen der drei Kluftmeßbereiche lassen deutlich zwei zeitlich unabhängige tektonische Beanspruchungspläne in dieser Region erkennen. Eine erste postdevonisch-präkretazische Bewegung (varistische Phase) prägte die Schiefer des Ordoviz und die Tonschiefer und Sandsteine des Devons. Unabhängig davon erfolgte eine zweite, postkretazische Bewegung (andine Phase ?), die die gesamten im Bearbeitungsgebiet auftretenden Sedimentgesteine erfaßte.

Wie im vorherigen Kapitel erwähnt, zeigen die Kluftazimute der Luftbildmessungen gegenüber den Geländemessungen ähnliche Maxima. Auch hier beobachtet man vorherrschende Kluftmaxima in den Richtungen um 0° , 60° - 65° , 115° und 145° . Auffallend ist das Fehlen der E-W Richtung. Entgegen den Geländemessungen fehlt bei den im Luftbild gemessenen Klüften die NE-SW Richtung. Diese Klufttrichtung fällt im Gelände flach ein. Da aus dem Luftbild nur Klüfte stärkeren Einfallens erkannt werden können (LlST, 1968), ist das flachere Einfallen der im Gelände gemessenen NE-SW Klüfte die Ursache für das Fehlen dieser Klufttrichtung im Luftbild.

Die Werte der Klüftigkeit (K) und Kluftdichte (D_K) liegen in allen drei geologischen Einheiten eng zusammen und doch

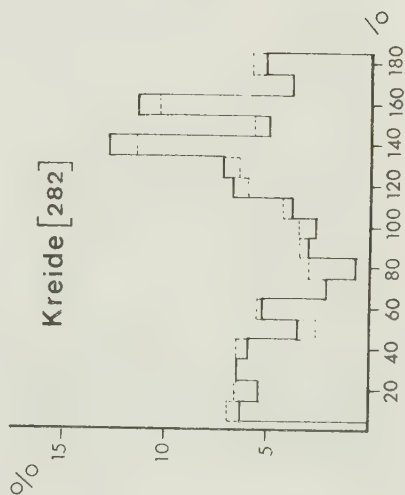
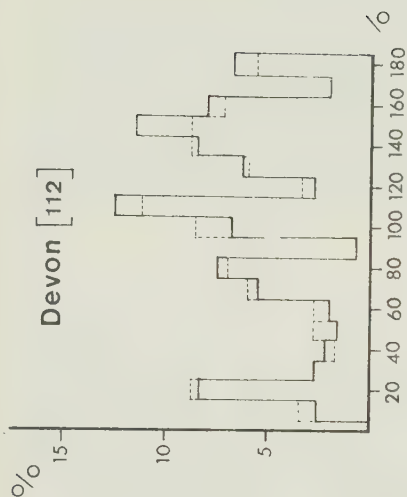
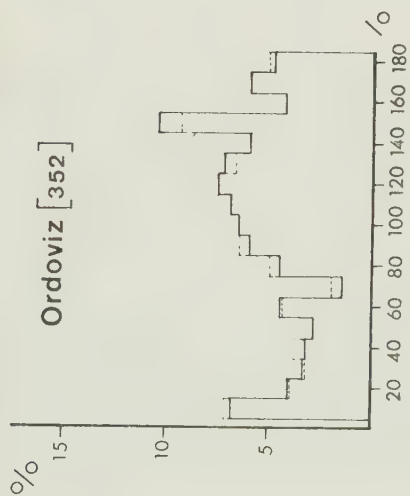


Fig. 32: Richtungsverteilung der im Luftbild gemessenen Klüfte im Gebiet Apolo. Aufgetragen sind die prozentualen Längen (durchgezogene Linie) und Anzahlen (gestrichelte Linie) pro Gradklasse und die Gesamtanzahl der Messungen.

lassen sich gewisse typische Unterschiede erkennen.

Die ordovizischen Schiefer weisen die geringsten K - und D_K -Werte auf. Dagegen zeigen die devonischen Schichten in diesem Gebiet die höchsten Werte. Aufgrund des Materialwechsels in diesen Serien (härtere Sandsteinbänke - weichere Schieferlagen) ist eine etwas stärkere Zerklüftung des Gesteins im Luftbild zu erkennen, die sich auch in den K - und D_K -Werten widerspiegelt.

B) Entwässerungsnetz

Zur Ermittlung der Entwässerungsnetzparameter im Gebiet Apolo wurden 6 Meßbereiche in Form von 6 Einheitskreisen (Radius = 1 km) ausgewählt (Fig.33). Bei einem Vergleich dieser Entwässerungsbereiche anhand des SPEARMAN Rang-Korrelations-Tests und des Chi-Quadrats-Tests zeigt sich, analog den Kluftmeßbereichen, eine signifikante Korrelation zwischen den Meßbereichen Ordoviz und Devon, die in ihren Anzahlverteilungen sogar vollkommene Übereinstimmung aufweisen (Tab.11). Dagegen beobachtet man zwischen den Bereichen Devon und Kreide keine Korrelation. Die Ursache darin liegt an dem Einfluß der Morphologie auf die Ausbildung des Entwässerungsnetzes. Da die kretazischen Sandsteine die steilen, schroffen Berghänge des Altuncama-Höhenrückens bilden, ist das Entwässerungsnetz zumeist senkrecht zur Streichrichtung des Bergrückens angeordnet.

In der Figur 34c erkennt man aus diesem Grunde, im Gegensatz zu den Figuren 34a und 34b, ein starkes Vorherrschen der 30° -Richtung. Dagegen tritt die Streichrichtung des Gebirges (120°) in den kretazischen Sandsteinen nur untergeordnet auf.

Entgegen der morphologischen Kontrolle des Entwässerungsnetzes in den kretazischen Sandsteinen wird das Entwässerungsnetz in den Gebieten der ordovizischen und devonischen

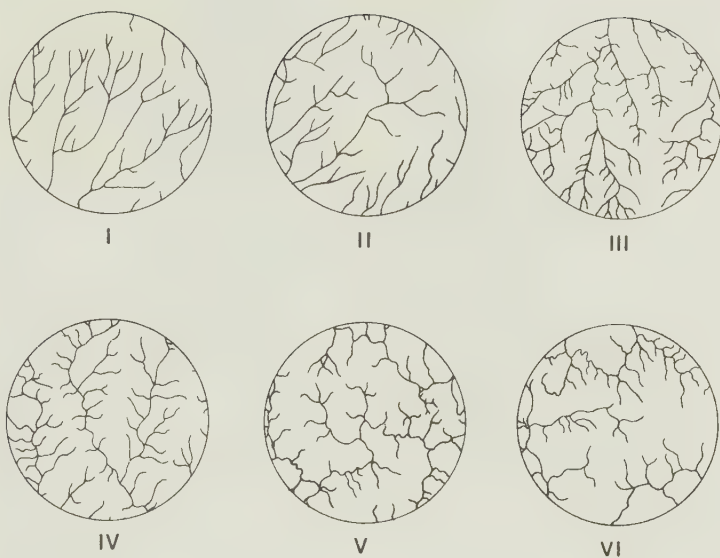


Fig.33: Meßbereiche I-VI zur Ermittlung der Entwässerungsdichte (D_E) und der Richtungsverteilung der Entwässerungssegmente im Gebiet Apolo

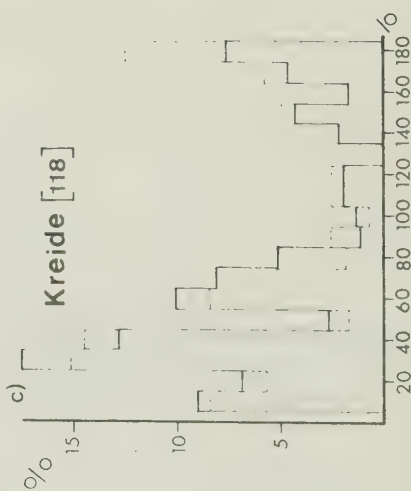
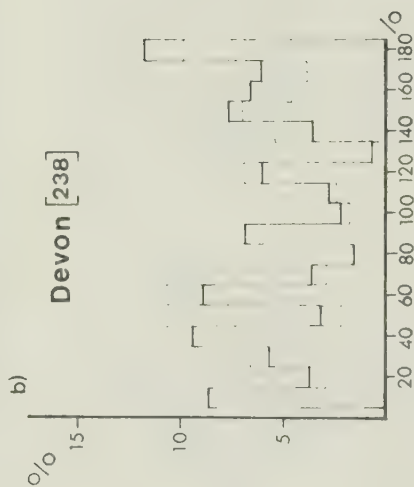
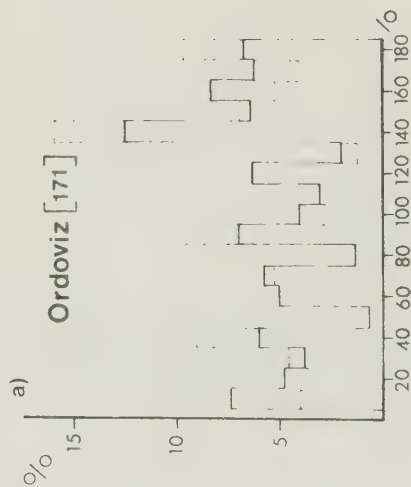


Fig. 34: Richtungsverteilung der im Luftbild gemessenen Entwässerungssegmente im Gebiet Apolo. Aufgetragen sind die prozentualen Längen (durchgezogene Linie) und Anzahlen (gestrichelte Linie) pro Gradklasse und die Gesamtanzahl der Messungen.

Schiefer weitgehend tektonisch kontrolliert. Alle im Gelände und im Luftbild gemessenen Kluftmaxima spiegeln sich in den Verteilungen der Entwässerungs-Histogramme wider. Man erkennt die 0° -, 40° -, 60° - 65° -, 120° - und 145° -Richtungen. Hinzu kommen Maxima in der E-W Richtung.

Bei einem Vergleich der Kluft- und Entwässerungsnetze in ihren Längen- und Anzahlverteilungen durch SPEARMAN's Rang-Korrelations-Test im Gebiet Apolo (Tab.12) zeigt sich jedoch nicht nur in dem morphologisch kontrollierten Entwässerungsnetz der kretazischen Sandsteine, sondern auch in den zumeist tektonisch kontrollierten Entwässerungsnetzen der Ordoviz- und Devon-Schiefer eine negative Korrelation. Allein in den Längenverteilungen des Kluft- und Entwässerungsnetzes im Ordoviz ist eine Korrelation, aber keine vollkommene Übereinstimmung, zu beobachten. Da bei diesem Vergleich die gesamten Histogramme und nicht nur ihre Maxima gewertet werden, und zudem immer zu den tektonischen Einflüssen noch morphologisch-lithologische Beeinflussungen treten, erklären diese Faktoren den scheinbaren Widerspruch.

Ebenso wie in den Gebieten Huayna Potosí und Rurrenabaque erkennt man bei einem Vergleich der Längen- und Anzahlverteilungen der Kluft- und Entwässerungsnetze anhand des SPEARMAN Rang-Korrelations-Tests und des Chi-Quadrat-Tests (Tab.13) zwischen diesen eine signifikante Korrelation und sogar vollkommene Übereinstimmung untereinander.

Ebenso wie in den beiden weiteren Bearbeitungsgebieten zeigen die drei Entwässerungs-Histogramme (Fig.34) eine stärkere Betonung der Maxima-Minima-Ausbildung als die entsprechenden Klufttrichtungs-Verteilungen. Bei letzteren ist der ausgeglichenerer Kurvenverlauf vermutlich darauf zurückzuführen, daß um einige wenige regional vorgegebene Haupt-Kluft-Richtungen eine breite Streuung der Richtungen besteht.

In Fig.34 erkennt man außerdem eine stärkere Betonung der Maxima-Minima-Verteilungen in den Anzahlverteilungen als in den Längenverteilungen. Aus diesem Grunde sind die Anzahlvertei-

lungen zur Verdeutlichung besonders charakteristischer Kurventeile gut geeignet.

Die Entwässerungsdichten (D_E) der drei verschiedenen geologischen Einheiten im Bearbeitungsgebiet Apolo (Tab.14) liegen ebenfalls eng zusammen. Allein die devonischen Schichten weisen etwas höhere D_E -Werte auf.

Auch die Entwässerungsformen sind untereinander ähnlich ausgebildet. Nur die durch steile morphologische Formen hervorgerufene subparallele Form des Entwässerungsnetzes der kretazischen Sandsteine weicht etwas von den anderen Entwässerungsformen ab.

Tabelle 10: Vergleich der Kluftmeßbereiche der im Luftbild gemessenen Klüfte mit dem SPEARMAN Rang-Korrelations-Test (R_s) und dem Chi-Quadrat-Test (χ^2/A und χ^2/L) im Gebiet Apolo
($R_s = 0,399$ bei $\alpha = 0,05$ / $\chi^2 = 27,6$ bei $\alpha = 0,01$)

Vergleich	R_s	χ^2/A	χ^2/L	Art	Lithologie
Ordoviz-Devon	0,4581	36,3	72,4	Kluft	Schiefer-Sandst.
Devon-Kreide	0,2472	56,4	115,2	Kluft	Sandst.-Grobsd.

Tabelle 11: Vergleich der Entwässerungsbereiche im Luftbild mit dem SPEARMAN Rang-Korrelations-Test (R_s) und dem Chi-Quadrat-Test (χ^2/A und χ^2/L) im Gebiet Apolo
($R_s = 0,399$ bei $\alpha = 0,05$ / $\chi^2 = 27,6$ bei $\alpha = 0,01$)

Vergleich	R_s	χ^2/A	χ^2/L	Art	Lithologie
Ordoviz-Devon	0,4578	22,0	32,3	Entw.	Schiefer-Sandst.
Devon-Kreide	0,1642	--	--	Entw.	Sandst.-Grobsd.

Tabelle 12: Vergleich der Kluft- und Entwässerungsnetze in ihren Längen- und Anzahlverteilungen mit dem SPEARMAN Rang-Korrelations-Test (R_s) im Gebiet Apolo
($R_s = 0,399$ bei $\alpha = 0,05$)

Vergleich	R_s	Art	Stratigraphie	Lithologie
Entw./Kluft	-0,7739	Länge	Kreide	Grobsandstein
Entw./Kluft	-0,5525	Länge	Devon	Sandstein
Entw./Kluft	0,4329	Länge	Ordoviz	Schiefer
Entw./Kluft	-0,1681	Anzahl	Kreide	Grobsandstein
Entw./Kluft	-0,0165	Anzahl	Devon	Sandstein
Entw./Kluft	0,1006	Anzahl	Ordoviz	Schiefer

Tabelle 13: Vergleich der Längen- und Anzahlverteilungen (L / A) der Kluft- und Entwässerungsnetze mit dem SPEARMAN Rang-Korrelations-Test (R_s) und dem Chi-Quadrat-Test (χ^2/A und χ^2/L) im Gebiet Apolo ($R_s = 0,399$ bei $\alpha = 0,05$ / $\chi^2 = 27,6$ bei $\alpha = 0,01$)

Vergleich	R_s	χ^2/A	χ^2/L	Art	Stratigraphie	Lithologie
L / A	0,9664	1,9	1,9	Kluft	Kreide	Grobsdst.
L / A	0,9906	0,5	0,6	Kluft	Devon	Sandstein
L / A	0,9438	3,1	3,4	Kluft	Ordoviz	Schiefer
L / A	0,7784	15,2	15,0	Entw.	Kreide	Grobsdst.
L / A	0,7662	12,3	10,7	Entw.	Devon	Sandstein
L / A	0,7664	9,9	11,7	Entw.	Ordoviz	Schiefer

Tabelle 14: Entwässerungsparameter im Gebiet Apolo

Meßber.	Einheit	Untergrund	Form	D_E	Richtungsmaxima
I - II	Kreide	Sandstein	subparallel	5,20	30/60/90/115/145/180/
III-IV	Devon	Schiefer	subparallel-subdendrit.	7,02	40/60/90/120/150/180/
V - VI	Ordoviz	Sandstein/Schiefer	subdendrit.	5,41	40/70/90/120/140/180/

8.4. Gebiet RURRENABAQUE

8.4.1. Lithologie

Nachdem die ersten Arbeiten noch unter dem Aspekt der Erdöl-suche standen (BARTH, 1926 und 1929), hat sich als erster Autor CANEDO REYES (1947) mit der Stratigraphie dieser Region befaßt.

Doch erst in den letzten Jahren wurden die Fragen der Stratigraphie und Tektonik näher untersucht. Hier liegen Arbeiten von BOTELLO (1967), BRANDL-GIESSEN (1957), CASTAÑOS (1972), DÁVILA, VARGAS & PONCE DE LEON (1965), DIAZ (1959), KEENAN (1969), LOPEZ-MURILLO (1967), PADULA (1959), PADULA & REYES (1958), PLAFKER (1962), PONCE DE LEON & HOSCHTATTER (1968) und VARGAS & MARIACA (1965) vor.

Wie aus dem geologischen Säulenprofil (Fig.35) zu entnehmen ist, wird dieses Gebiet durch folgende lithologische Einheiten aufgebaut:

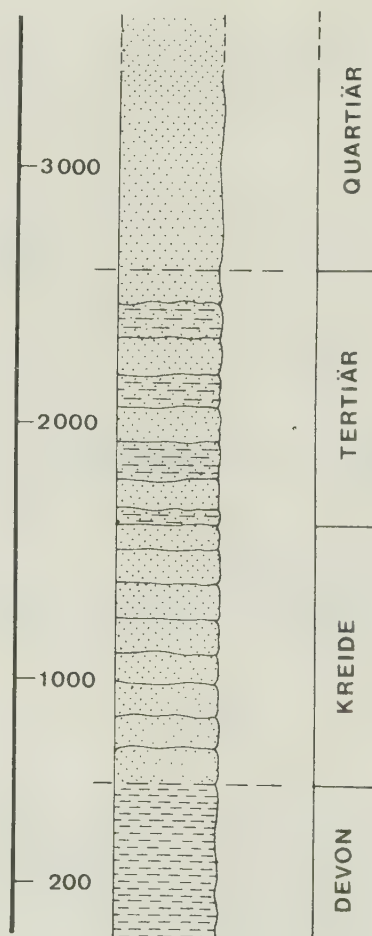
- d) Lockersedimente (Quartär)
- c) Quendeque-Sandstein (Tertiär)
- b) Beu-Eslabón-Bala - Sandstein (Kreide)
- a) Tequeje-Schiefer (Devon)

8.4.1.a) Tequeje-Schiefer (Devon)

Das stratigraphisch tiefste Schichtglied im Bearbeitungsgebiet Rurrenabaque bilden die marinen Schiefer und tonigen Sandsteine der Formation Tequeje des Devons. Im folgenden wird auch hier der Begriff "Formation" entsprechend dem anglo-amerikanischen Sprachgebrauch verwandt.

Säulenprofil
im Gebiet
RURRENABAQUE

Mächtigkeit
[m]



 Schiefer  Sandstein  sandiger Schiefer  Lockermaterial

Fig. 35

Man findet die devonischen Schichten im Kern der Antiklinalen im S (Bala-Gebirgshogen) und N (Susi-Gebirgshogen) des Gebietes, wobei sie über die ganze streichende Länge der Antiklinalen zu verfolgen sind.

Spezielle Arbeiten über das Devon der "Faja Subandina del Norte" (nördliches Vorgebirge) existieren nach Wissen des Verfassers nicht, jedoch wird das Devon, ebenso wie die jüngeren Schichtglieder, innerhalb umfassenderer Stratigraphiebeschreibungen miteinfaßt.

Die Formation Tequeje wird durch grau-grüne, hell- bis schwarzgraue Schiefer gebildet, die fein gebändert sind und z.T. Glimmerpartikel enthalten.

Die Schieferlagen verwittern zu kleinen Brocken und bilden durch ihre geringe Erosionsresistenz meist flachere Geländeformen aus. Ihre Mächtigkeiten schwanken zwischen 1 mm und 30 cm.

Geringmächtige, grau-grüne, feinkörnige bis sehr feinkörnige, z.T. tonige Sandsteine sind den Schieferlagen zwischengeschaltet. Diese Sandsteine haben einen quarzitischen Zement, subangulare bis gut gerundete Quarzkörner, eine gute Sortierung und weisen Bankmächtigkeiten von bis zu 50 cm auf. Die Sandsteinlagen sind härter als die Schiefer und zeigen Lamination. PONCE DE LEON & HOSCHTATTER (1968) haben zudem noch Kreuzschichtung festgestellt. Die Schiefer weisen noch z.T. Einschaltungen von Limonit und eisenhaltigen Konkretionen auf (CANEDO REYES, 1947 und BOTELLO, 1967).

CANEDO REYES (1947) gibt folgende Fossilien zur genaueren stratigraphischen Einordnung an:

Nuculites pacatus (REED)

Chonostrophia (KNODI)

Scaphiocoelia boliviensis (WITFIELD)

Schuchertella agassizi

Australocoelia cf. *tourteloti* (GILL-BONCOT) etc.

Er stellt die untersuchten Serien in die Stufen Ems-Siegen. DIAZ (1959) dagegen siedelt sie in den Stufen Siegen-Gevet an und gibt noch folgende zusätzliche Fossilien an:

Leptocoelia flabellitis

Chonetes minuscula

Lingula scalpum

Als letzter Bearbeiter von Devonfossilien in diesem Gebiet hat CASTAÑOS (schriftl.Mitt.) noch zwei Fossilien zu den vorhergenannten hinzugefügt:

Tropidoleptus carinatus

Bellerophon cf. *globosus*

Die devonischen Sedimente wurden wahrscheinlich in geringen Meerestiefen ruhig abgelagert.

Die Schiefer des Devons fallen steil nach S ein und bilden jeweils den Kern der beiden Susi- und Bala-Antiklinalen.

Die Tequeje-Schichten zeigen zudem eine ausgeprägte Klein-klüftung und eine intensive Kleinfaltung.

Die aufgeschlossene Mächtigkeit der devonischen Schichten ist im Bearbeitungsgebiet mit ca. 600 m anzugeben.

Die devonischen Sedimentite lassen sich im Luftbild anhand verschiedener Parameter von den beiden anderen geologischen Einheiten (Kreide-Tertiär) unterscheiden:

- 1.) lithologische Ausbildung: Schiefer
- 2.) Homogenität : einheitlich
- 3.) Oberflächenstruktur : durch einheitliche Vegetationsbedeckung nicht erkennbar
- 4.) relative Härte : ziemlich weich
- 5.) Grauwert : 7 - 10
- 6.) Klüftung : Kleinklüfte
- 7.) Klüftigkeit (K) : $3,6 \text{ km}^{-2}$
- 8.) Kluftdichte (D_K) : $1,8 \text{ km}^{-1}$
- 9.) Entwässerungsform : dendritisch bis subdendritisch
- 10.) Entwässerungsdichte (D_F): $5,41 \text{ km}^{-1}$

Im Luftbild zeigen die Schichten, wie auch alle folgenden, eine geschlossene Waldbedeckung. Da diese dichte Vegetationsdecke alle kleineren Klüfte und Entwässerungssegmente ("finger tip channels") überdeckt, ist ein besonders hoher Klüftigkeitsindex und eine hohe Entwässerungsdichte nicht zu erwarten und auch nicht zu beobachten. Allein die etwas flacheren, sanfteren Geländeformen der devonischen Schiefer können zur Abgrenzung derselben gegenüber den kretazischen Sandsteinen im Luftbild herangezogen werden.

8.4.1.b) Beu-Eslabón-Bala-Sandstein (Kreide)

Das nächstjüngere Schichtglied, der Beu-Eslabón-Bala-Sandstein (im folgenden als "BEB-Sandstein" bezeichnet), repräsentiert die Kreideablagerungen im Bearbeitungsgebiet und liegt diskordant auf den devonischen Tequeje-Schiefern.

Die marinen kretazischen Sandsteine bauen die beiden steilen, schroffen Gebirgsbögen "Bala" und "Susi" auf und bilden die morphologisch höchsten Punkte im Gebiet.

Nach der Auffassung vieler bolivianischer Geologen über die kretazischen Sedimentgesteine im Bearbeitungsgebiet soll der Sandstein in folgende drei Untergruppen gegliedert werden können (CASTAÑOS, 1970; BOTELLO, 1967; DIAZ, 1959):

- 3) Formación Bala
- 2) Formación Eslabón
- 1) Formación Beu

Da sich der Eslabón-Sandstein nur sehr schwer von dem darunterliegenden Beu-Sandstein und dem darüberliegenden Bala-Sandstein unterscheiden läßt, wobei man nach CASTAÑOS (1970), BOTELLO (1967) und DIAZ (1959) ein Schichtpaket von nur 15 m Mächtigkeit aus einer Schichtfolge von ca. 1000 m Sandstein auskartieren muß, hat der Verfasser diese Serien im Gelände

nicht getrennt kartiert. Da auch im Luftbild eine Gliederung der drei Sandsteinserien aufgrund der Gleichartigkeit ihrer Faziesausbildung nicht eindeutig durchgeführt werden konnte, wurden die drei kretazischen Sandsteinserien bei der photogeologischen Interpretation zu einer Sandstein-Formation zusammengefaßt.

Die Dreiteilung der kretazischen Sandsteine im Bearbeitungsgebiet ist auch bei der Mehrzahl der bolivianischen Geologen umstritten und wird vielfach nur als eine lokale Faziesänderung angesehen. Trotzdem soll im folgenden der Versuch gemacht werden, anhand der vorhandenen Literatur eine lithologische Beschreibung der drei verschiedenen Sandsteinserien vorzunehmen.

8.4.1.b.1) Formación Beu

An der Basis der Kreide-Sedimentite liegen die Sandsteine der Beu-Formation. Es sind im wesentlichen ziegelrote bis dunkel-braune, quarzitische Sandsteine mit feiner bis mittelgrober Körnung und einer guten Klassierung der Körner. Die Sandsteine sind bröckelig, aber in ihrer Gesamtheit sehr erosionsresistent. Sie zeigen eine ausgeprägte Kreuzschichtung und Lamination (BOTELLO, 1967; CASTAÑOS, 1970). Eine Bankung ist nicht zu erkennen.

Die Sandsteine sind oft von hellgrauen, gelblichen, dunkelbraunen, grünen und schwarzen Flechten überzogen.

In den höheren Teilen der Beu-Formation zeigen die Sandsteine eine schlechte Klassierung. Ihre Farbe wird insgesamt heller. Sie schwankt zwischen hellgelb und hellrot-braun. Kreuzschichtung und Lamination treten gar nicht oder nur untergeordnet auf.

Unter dem Mikroskop kann man die schlechte Klassierung erkennen. Die großen Quarzkörner (ca. 0,5 mm) sind subgerundet bis gut gerundet, während die kleinen Quarzkörner (ca. 0,05 mm) subangular bis subgerundet auftreten.

Die Quarzkörner sind in einer kieseligen, durch Limonitbeimengungen gefärbten Matrix eingebettet, die teilweise radialständig um die Quarzkörner herum kristallisiert und teilweise als Mikrolith-Gemenge auftritt.

Auch kleine, gerundete Zirkon- und Turmalinkristalle kann man beobachten. Neben diesen Gemengteilen finden sich noch Limonitkörner, klastische Glimmerpartikel, Biotite, Einschlüsse von mylonitischen Quarzbrocken und opake Anteile in der Matrix. Auffallend ist das untergeordnete Auftreten von Plagioklas und Mikroklin.

Fossilien sind vom Verfasser im Beu-Sandstein nicht gefunden worden und sind auch in der einschlägigen Literatur nicht bekannt. PONCE DE LEON & HOSCHTATTER (1968) und LOPES-MURILLO (1967) vergleichen anhand der Faziesausbildung den Beu-Sandstein mit der Formation Tacuru der "Faja Subandina Central". LAMB & TRUIT (1963) vergleichen sie mit den Formationen Surutú und Cajones der "Faja Subandina del Sud".

Die Sedimentgesteine der Beu-Formation fallen steil nach S ein. Man erkennt keine Kleinklüftung, dafür aber eine wechselnd gut ausgebildete Großklüftung.

8.4.1.b.2) Formación Eslabón

Der Eslabón-Sandstein liegt schwach diskordant dem Beu-Sandstein auf.

CANEDO REYES (1947) hat diese Formation zuerst gefunden und nach dem gleichnamigen Gebirge am Fluß Eslabón genannt. Generell erkennt man an der Basis dieser Schichten einen rötlich-braunen Konglomerathorizont mit einer tonig-kieseligen Matrix und mit quarzhaltigen (sandig-kieseligen) und kalkhaltigen Geröllen.

Seine Mächtigkeit schwankt zwischen 2 m und 15 m.

Die Basis-Konglomerate werden zur Unterteilung der gleich-

förmigen Sandsteinserien der Beu- und Bala-Formation benutzt und stellen eine kurzzeitige, regionale Faziesänderung in diesem Raum dar.

In den höheren Teilen des Eslabón-Sandsteins herrschen hellgelbe, graurote und braune Quarzsandsteine vor, die porös und hart sind und eine feinkörnige Klassierung aufweisen. In einigen Partien erkennt man Kreuzschichtung und Lamination, ebenso wie Einschlüsse von Klastiten der Beu-Formation. Diese Sandsteinpartien haben grün-graue bis dunkelgraue Einschaltungen von Tonen und Limoniten.

PONCE DE LEON (1968) vergleicht den Eslabón-Sandstein mit der Formation Pataca der "Faja Subandina Central". Auch hier sind Fossilien nicht bekannt.

Die Sedimentgesteine der Eslabón-Formation fallen ebenfalls steil nach S ein. Sie zeigen eine z.T. gut ausgebildete Großklüftung.

8.4.1.b.3) Formación Bala

Das jüngste Schichtglied der Kreideablagerungen ist der Sandstein der Bala-Formation.

Zusammen mit den Sedimentiten der Beu- und Eslabón-Formation kommt der Bala-Sandstein in den beiden Antiklinalen "Bala" und "Susi" vor.

Es handelt sich hier um einen quarzitischen Sandstein von hellgelber, hellgrauer und hellbrauner Farbe. Die Sandsteine sind hart, fein- bis mittelkörnig, gut klassiert, fast rein von Beimengungen und von hoher Porosität. Sie zeigen Kreuzschichtung und Lamination und bilden Bänke von 0,15 m bis 5 m Mächtigkeit (Abb.24). Einzelne Bänke im mittleren Teil der Formation können bis zu 25 m mächtig werden. Dagegen gehen die Bankmächtigkeiten in den höheren Partien kaum über 1 m hinaus.

Man findet zudem in den höheren Teilen des Bala-Sandsteins kalkige Einschaltungen.

Auch im Bala-Sandstein ist dem Verfasser kein Fossilfund bekannt.

LOPEZ-MURILLO (1967) und BRANISA (1970) stellen die Bala-Formation bereits in das Tertiär, und zwar in die Stufen Eozän-Oligozän, während BOTELLO (1967), DIAZ (1959) und auch CASTAÑOS (1970 und nach mündl.Mitt.) diese Formation noch in die Kreide legen. Jedenfalls ist die stratigraphische Einordnung noch nicht vollkommen geklärt. Der Verfasser entschied sich dafür, die Formation noch in die Kreide zu stellen aufgrund der sehr ähnlichen Faziesausbildung der Bala- und Beu-Sandsteine.

Den Bala-Sandstein vergleichen PONCE DE LEON & HOSCHTATTER (1968) mit einer äquivalenten Formation in der "Faja Subandina Central" und ordnen ihn der Formation Yecua zu.

Analog den Formationen Beu und Eslabón fallen auch die Sedimentgesteine der Formation Bala steil nach S ein und zeigen eine z.T. gut ausgebildete Großklüftung.

Die kretazischen Sandsteine wurden in Küstennähe in geringen Meerestiefen ruhig abgelagert.

Die aufgeschlossene Mächtigkeit der kretazischen Schichten im Bearbeitungsgebiet liegt bei etwa 1200 m.

Im Luftbild kann man die Sedimentite der Kreide gut anhand verschiedener Unterscheidungsmerkmale ausgliedern und damit kartieren:

- 1.) lithologische Ausbildung: Sandstein
- 2.) Homogenität : einheitlich
- 3.) Oberflächenstruktur : sandig-rauh, massig
- 4.) relative Härte : hart
- 5.) Grauwert : 3 - 6
- 6.) Klüftung : Mittel- bis Großklüfte
- 7.) Klüftigkeit (K) : 4,4 km⁻²
- 8.) Kluftdichte (D_K) : 2,2 km⁻¹

- 9.) Entwässerungsform : subparallel
10.) Entwässerungsdichte (D_E): $5,63 \text{ km}^{-1}$

Durch seine charakteristisch steilen, schroffen Wände und seine durch gute Erosionsresistenz bedingte positive morphologische Ausbildung ist der kretazische Sandstein im Luftbild gut gegenüber den anderen stratigraphischen Einheiten zu erkennen und auszukartieren. Jedoch verwischen auch hier dichte, geschlossene Vegetationsdecken alle feineren Unterschiede im Klüftigkeitsindex und in der Entwässerungsdichte (Tab.17).

8.4.1.c) Quendeque-Sandstein (Tertiär)

Auf die kretazischen Sandsteine folgen konkordant die tertiären Sedimentgesteine der Quendeque-Formation. Jedoch ist dieser Übergang nach CASTAÑOS (1970) nicht eindeutig festzulegen.

Die tertiären Sandsteine bilden den Kern der Rurrenabaque-Synklinale und sind auch im S des Bearbeitungsgebietes zu beobachten. Die Quendeque-Ablagerungen bestehen aus alternierenden Schichten von grobkörnigen und tonigen Sandsteinen.

Die Sandsteine haben eine rötlich-braune bis dunkelbraune Farbe. Sie sind hart und enthalten in ihrer oft limonitischen Matrix Hellglimmer. In seinen höheren Teilen wird der Quendeque-Sandstein etwas kalkhaltiger.

Die Bankmächtigkeiten variieren, wobei mit zunehmendem tonigen Anteil die Mächtigkeit abnimmt. Sie liegt zumeist im m-Bereich.

Unter dem Mikroskop ist der sphäroidisch strukturierte Matrixlimonit zu erkennen, der sich z.T. zu länglichen, sich vernetzenden Aggregaten zusammenschließt. In dem serizitisch-limonitischen Zement zeigen sich verzahnte Quarzkörner, klastische Hellglimmer, Turmaline und idiomorph bis gut gerundete Zirkone mit Zonarbau (Abb.25).

Nach CASTAÑOS (1970) sind in dem Quendeque-Sandstein im Bearbeitungsgebiet keine Fossilfunde bekannt. Nur aufgrund von Vergleichen mit der "Faja Subandina Central" stellt man diese Formation in das Tertiär.

Die tertiären Ablagerungen fallen flach nach S bzw. N ein oder liegen horizontal bis subhorizontal. Im allgemeinen herrscht in ihnen Großklüftung vor.

Die aufgeschlossene Mächtigkeit der Formation Quendeque liegt im Bearbeitungsgebiet bei ca. 1000 m.

Auch die tertiären Sedimentgesteine weisen im Luftbild charakteristische Unterscheidungsmerkmale auf, die es erlauben, sie von den anderen lithologischen Einheiten zu trennen:

- 1.) lithologische Ausbildung: Wechsellagerung Feinsandstein - Grobsandstein
- 2.) Homogenität : durch Materialwechsel nur schwach einheitlich
- 3.) Oberflächenstruktur : durch einheitliche Vegetationsbedeckung nicht erkennbar
- 4.) relative Härte : wechselnd, insgesamt ziemlich weich
- 5.) Grauwert : 7 - 10
- 6.) Klüftung : Mittel- bis Großklüfte
- 7.) Klüftigkeit (K) : $2,3 \text{ km}^{-2}$
- 8.) Kluftdichte (D_K) : $1,2 \text{ km}^{-1}$
- 9.) Entwässerungsform : subdendritisch
- 10.) Entwässerungsdichte (D_E): $5,03 \text{ km}^{-1}$

Im Luftbild sind die Quendeque-Schichten an ihren flacheren morphologischen Formen -im Gegensatz zum BEB-Sandstein- zu erkennen. Ansonsten verdeckt auch hier eine dichte, geschlossene Vegetation etwaige faziesbedingte Unterschiede, ebenso wie Unterschiede im Klüftigkeitsindex und in der Entwässerungsdichte (Tab.17).

8.4.1.d) Lockersedimente (Quartär)

Im Gegensatz zum Gebiet Apolo sind im Bearbeitungsgebiet Rurrenabaque Quartärsedimente wieder flächenmäßig weit verbreitet. Sie sind im gesamten nördlichen und östlichen Teil dieses Gebietes und entlang des Rio Beni zu beobachten. Mächtige Lockersedimente überlagern in diesem Gebiet die präkambrischen Gesteine des brasilianischen Schildes und nehmen Mächtigkeiten von mehreren tausend Metern an (AHLFELD, 1972).

Der Hauptanteil der quartären Sedimente ist in der alluvialen Ebene zu finden, die aus einer weiten Schürze von Erosionsmaterial gebildet wird, das nach der Erhebung der Anden im jüngeren Tertiär von den Flanken der Anden her abgetragen wurde. In ihrem letzten Stadium wird die morphologische Ausbildung der Ebene durch lokale Umlagerung der Lockersedimente aufgrund von Flußänderungen gebildet. Diese Flußänderungen werden durch saisonbedingtes Überfluten hervorgerufen. An dieser häufig wechselnden Folge kann man ein ineinandergreifendes Muster von flachen, sandigen Furchen und tongefüllten seichten Senkungen ablesen.

Da die quartären Auffüllungen unter einer geschlossenen Walddecke liegen, sind sie nur anhand ihrer ebenen, durch keinerlei Erhebung unterbrochenen Form zu erkennen und auszukartieren. Dagegen sind die den Rio Beni flankierenden, fluvialen Terrassen ohne Vegetationsbewuchs in ihrer rezenten Ausbildung und mit Gras- und geringem Baumbewuchs in ihrem subrezentem Vorkommen im Luftbild gut zu erkennen und einzuordnen.

8.4.2. Tektonik

Das Gebiet Rurrenabaque liegt im östlichen, bereits im Flachland gelegenen Abschnitt der nördlichen subandinen Zone. Bei

der Betrachtung der Tektonik kann man dieses Gebiet in zwei geologisch-morphologische Einheiten gliedern:

- a) Beni-Tiefebene
- b) Vorgebirge

zu a) Nach PLAFKER (1962 und 1964) sollen sich alte Lineamente des präkambrischen Untergrundes (Brasilianischer Schild) durch die mehrere tausend Meter mächtige Quartärbedeckung durchgepaust haben. Diese Lineamente haben die Hauptstreichrichtungen NW-SE (um 140°) und NE-SW (um 50°) und sind zu erkennen an Seen mit rechteckigen, orientierten Umrissen und Vegetationslinien. Da Seen mit orientierten Längenerstreckungen im Bearbeitungsgebiet fehlen; die Auswertung der Vegetationslinien dem Verfasser zu unsicher und ungenau erschien und zudem die Beni-Tiefebene einen flächenmäßig geringen Anteil am Bearbeitungsgebiet aufweist, soll auf die Tektonik der Beni-Tiefebene nicht weiter eingegangen werden.

zu b) Wie schon im Kap.8.3.2. erwähnt, zeigt die nördliche subandine Zone einen Wechsel von schmalen, scharfen, asymmetrischen Sätteln und breiten Mulden (intramontanen Längstälern). Gerade dieser Wechsel wird im Gebiet Rurrenabaque deutlich (Fig.36). Die scharfen und schmalen Antiklinalen im S und N des Bearbeitungsgebietes zeigen sich in den Susi- und Bala-Gebirgsbögen. In ihrem Kern finden sich zumeist nach S einfallende devonische Sedimentgesteine, die von mächtigen, ebenfalls nach S ziemlich steil einfallenden, kretazischen Sandsteinen überlagert werden. Durch tiefgreifende Störungen, die die Antiklinalen zerschneiden, ist jeweils der nördliche Teil abgeschoben und der südliche relativ gehoben worden. Als breites, intramontanes Längstal liegt in diesem Gebiet die Synklinale von Rurrenabaque vor. Auch sie zeigt eine nordvergente, asymmetrische Faltenebene. Beide Faltenachsenenden tauchen im E und W des Bearbeitungsgebietes empor und geben somit dem gesamten Gebiet morphologisch ein ellipsoides Aussehen.

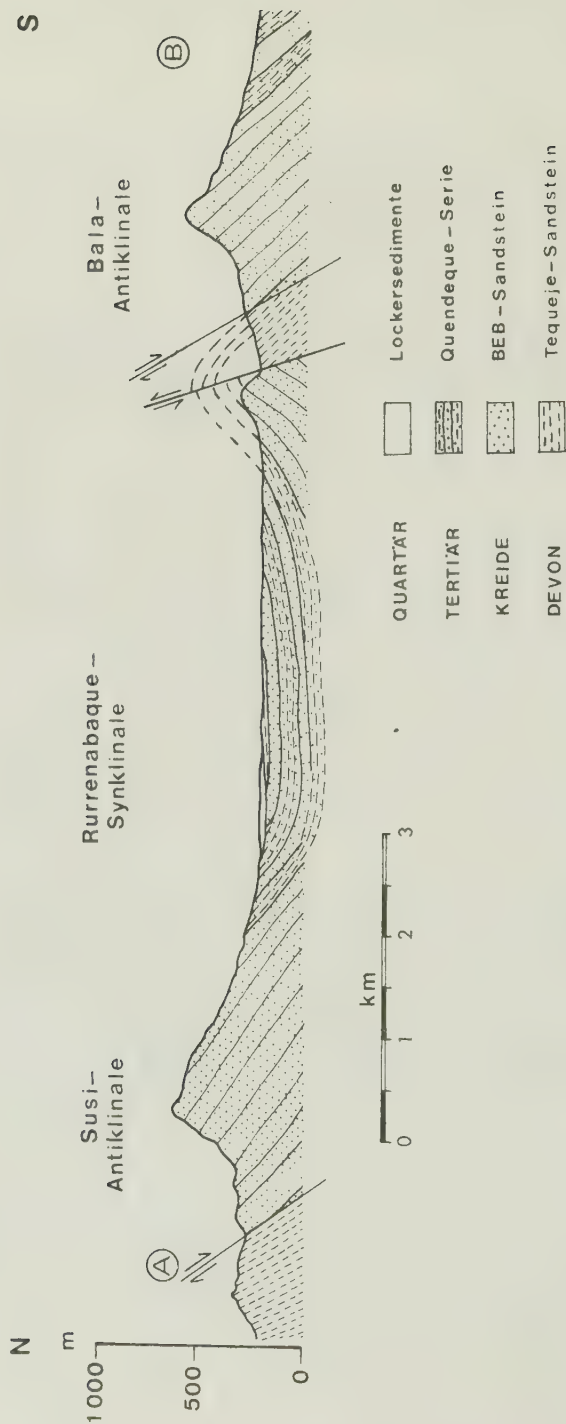


Fig. 36: Schematisches Querprofil durch das Arbeitsgebiet Rurrenabaque; (Überhöhung 1:2)

Im Gegensatz zu den dickbankigen kretazischen Sandsteinen zeigen die devonischen Tequeje-Schiefer eine lokal ausgeprägte Kleinfaltung im m-Bereich.

Eine statistische Messung der Klufrichtungen im Gelände erwies sich aufgrund der starken Vegetations- und Lockersedimentbedeckung der Gesteine als schwierig.

Die devonischen Schiefer zeigen vorherrschend steile E-W streichende Klüfte und etwas flacher einfallende NE-SW streichende Klüfte.

In den kretazischen und tertiären Sedimentiten dagegen sind die Klufrichtungen stärker aufgefächert. Man erkennt ausgeprägte, NE-SW-, E-W- und NW-SE-streichende Klufrichtungen, wie sie von PLAFKER (1962 und 1964) auch für die orientierten Umrissse der Seen im Beni-Tiefland angegeben wurden. Bemerkenswert ist das Fehlen der N-S-Richtung; ein Umstand, den auch PLAFKER (1962 und 1964) beobachtete.

Neben den eben beschriebenen Klufrichtungen treten noch die 65° - und die 120° -Richtungen auf. Eine ähnliche Klufrichtungsverteilung ergeben die Kluftmessungen aus dem Luftbild.

Zu bemerken ist noch, daß die E-W Klufrichtung fast saiger einfällt und die anderen Streichrichtungen um 50° einfallen.

Da flachliegende Klüfte im Bearbeitungsgebiet nicht beobachtet wurden und im Luftbild nicht beobachtet werden können (LIST, 1968 und 1969), ließ sich eine gute Korrelation der Kluftmessungen aus dem Gelände und dem Luftbild vermuten, was sich im folgenden dann auch bestätigte.

8.4.3. Photogeologische Ergebnisse

A) Kluftnetz

Wie schon in den vorangegangenen Kapiteln beschrieben, wirkt sich die einheitliche Vegetationsdecke im Gebiet Rurrenabaque

nachteilig für die Erfassung eines feindifferenzierten Kluft- und Entwässerungsnetzes aus. Vor allem bei der Kluftnetzauswertung zeigt sich die starke Vereinheitlichung der Kluftlängen. Einige wenige lange Klüfte sind zu erkennen und die kurzen Klüfte sind von der Vegetationsdecke verdeckt, so daß die mittlere Kluftlänge in den drei stratigraphischen Einheiten ziemlich genau um den Wert 500-550 m schwankt.

Bei der photogeologischen Interpretation des Gebietes Rurrenabaque und der darauffolgenden Auswertung der Ergebnisse wurden insgesamt 835 Klüfte eingemessen. Die 835 Klüfte entstammen den drei stratigraphischen Einheiten: Devon/Kreide/Tertiär, wobei sie sich folgendermaßen verteilen (Fig.37):

Devon	:	188 Klüfte,	$K=3,6$	/	$D_K=1,8$	(km^{-2} bzw. km^{-1})
Kreide	:	432 Klüfte,	$K=4,4$	/	$D_K=2,2$	(km^{-2} bzw. km^{-1})
Tertiär	:	215 Klüfte,	$K=2,3$	/	$D_K=1,2$	(km^{-2} bzw. km^{-1})

Bei einem ersten subjektiven Vergleich der drei Klufttrichungshistogramme scheinen diese keine gegenseitige Kontrolle und schon gar keine vollkommene Übereinstimmung aufzuweisen.

Bei eingehender Betrachtung zeigen sich vorherrschende Kluftrichtungen in allen drei stratigraphischen Einheiten, die z.T. gut übereinstimmen.

Analog den Geländeergebnissen beobachtet man die Richtungen 90° , 45° , 70° und 140° . Gegenüber den im Gelände gemessenen Richtungen zeigen sich zusätzlich noch die 0° - und die 20° -Richtung, dagegen fehlt das Vorherrschen der 120° -Klufttrichtung.

Das Fehlen dieser 120° -Richtung ist leicht zu erklären. Das Streichen der Gesteinseinheiten ist festgelegt durch die Streichrichtung der Rurrenabaque-Synklinale und der Susi- und Bala-Antiklinalen, die ca. 120° verlaufen. In Streichrichtung verlaufende Klüfte sind jedoch im Luftbild, wenn sie flach einfallen, oft nicht zu erkennen und, wenn sie steiler einfallen, nur schlecht von der Schichtung zu unterscheiden.

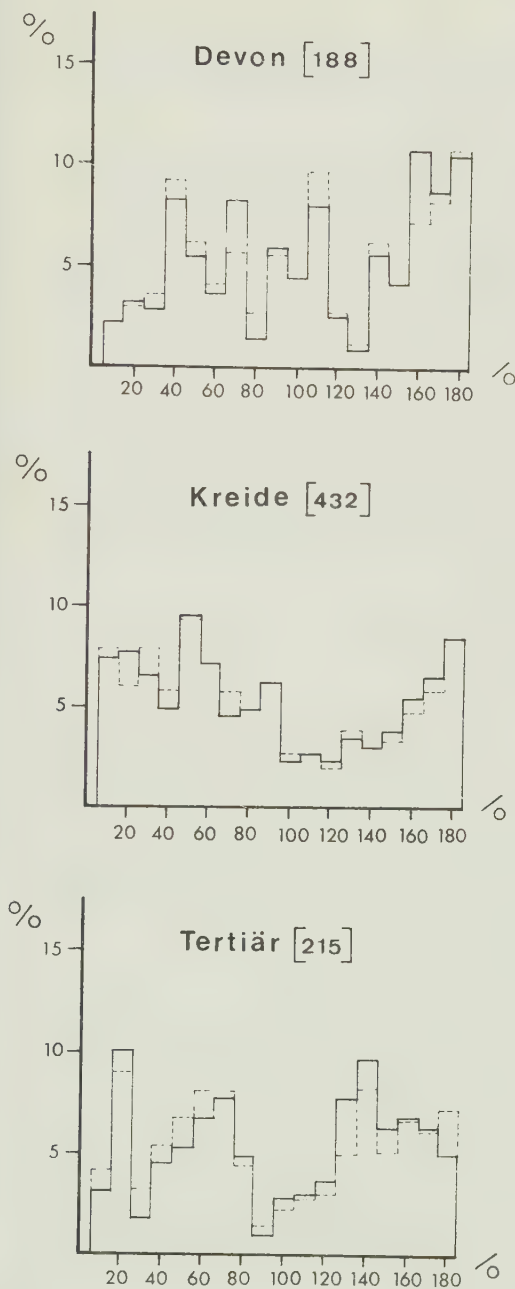


Fig.37: Richtungsverteilung der im Luftbild gemessenen Klüfte im Gebiet Rurrenabaque. Aufgetragen sind die prozentualen Längen (durchgezogene Linie) und Anzahlen (gestrichelte Linie pro Gradklasse und die Gesamtanzahl der Messungen).

Aus diesem Grunde treten Klüfte, die in der Streichrichtung verlaufen, nur untergeordnet in der Kluftstatistik auf.

Die Tabelle 15 zeigt einen Vergleich der Kluftmeßbereiche der im Luftbild gemessenen Klüfte anhand von SPEARMAN's Rang-Korrelations-Test und des Chi-Quadrat-Tests im Gebiet Rurrenabaque.

Bei einem gewählten Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$ ($R_s = 0,399$) zeigt sich eine signifikante Korrelation nur zwischen den Verteilungen der Meßbereiche Kreide/Tertiär. Die Ursache daran liegt in zwei zeitlich unterschiedlichen tektonischen Beanspruchungsplänen. Die erste Bewegungsphase beeinflusste postdevonisch-präkretazisch die Ausbildung der Klufttrichtungen im Devon und die zweite erfaßte posttertiär (Pliozän/Pleistozän nach AHLFELD, 1970) während der Haupthebungsphase der subandinen Zone das gesamte Bearbeitungsgebiet.

Bedingt durch eine unterschiedliche, morphologische und lithologische Ausbildung der kretazischen und tertiären Sedimentite ist jedoch nur eine Korrelation, jedoch keine vollkommene Übereinstimmung festzustellen.

Die leicht differierenden Klüftigkeiten (K) und Kluftdichten (D_K) sind auf die verschiedenartige lithologische und morphologische Ausbildung der drei geologischen Einheiten zurückzuführen. So weist der harte, steile Wände bildende, kretazische Sandstein die höchsten Werte auf, während die sehr flach liegenden tertiären Sedimentite die niedrigsten Werte erkennen lassen.

Insgesamt gesehen sind die K - und D_K -Werte sehr gering und liegen auch sehr eng zusammen, was vor allem durch die dichte geschlossene Vegetationsbedeckung in diesem Gebiet bedingt ist.

B) Entwässerungsnetz

Um das Kluft- und Entwässerungsnetz im Gebiet Rurrenabaque

miteinander vergleichen zu können, wurden auch in diesem Gebiet zur Ermittlung des Entwässerungsnetzes Einheitskreise verwendet.

In den drei stratigraphischen Einheiten wurden je zwei Meßbereiche ausgewertet (Fig.38).

Die drei Entwässerungshistogramme zeigen wesentlich stärker ausgeprägte Richtungsmaxima als die Klufttrichtungs-Verteilungen. Sie liegen bei 40° , 65° , 90° , 120° , 140° und 180° . Man erkennt, daß das Entwässerungssystem somit bis auf die 20° -Richtung alle im Gelände und im Luftbild gemessenen Hauptklufttrichtungen nachzeichnet (Fig.39).

Bei einem Vergleich mit SPEARMAN's Rang-Korrelations-Test und dem Chi-Quadrat-Test ergibt sich eine signifikante Korrelation der Entwässerungsbereiche untereinander in allen drei stratigraphischen Einheiten. Eine vollkommene Übereinstimmung ist dagegen nur zum Teil gegeben (Tab.16).

Obwohl durch die sehr ähnliche Ausbildung der Richtungsmaxima ein starker Zusammenhang zwischen dem Kluft- und dem Entwässerungsnetz gegeben zu sein scheint, zeigt ein Vergleich der Kluft- und Entwässerungsnetze in ihrer Längen- und Anzahlverteilung durch SPEARMAN's Rang-Korrelations-Test jeweils nur negative Korrelationen. Diese negativen Korrelationen erstrecken sich jedoch auf die gesamten Verteilungen und nicht allein auf die Ausbildung der Maxima und werden durch unterschiedlich starke Streuungen um die jeweiligen Maxima hervorgerufen. Die auftretenden Streuungen kennzeichnen die wechselnd starke Abhängigkeit des Kluft- bzw. Entwässerungsnetzes von den natürlichen Gegebenheiten (Morphologie, lithologische Ausbildung, Tektonik) eines Gebietes (Tab.17).

Analog den Ergebnissen aus den Gebieten Huayna Potosí und Apolo beobachtet man bei einem Vergleich der Längen- und Anzahlverteilungen der Entwässerungs- und Kluftsysteme durch SPEARMAN's Rang-Korrelations-Test und den Chi-Quadrat-Test auch im Gebiet Rurrenabaque eine signifikante Korrelation und sogar vollkommene Übereinstimmung (Tab.18).

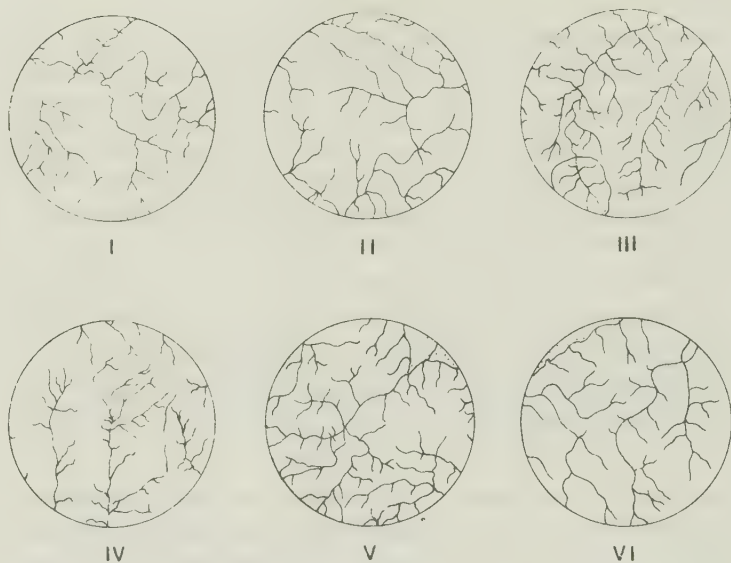


Fig. 38: Meßbereiche I-VI zur Ermittlung der Entwässerungsdichte (D_E) und der Richtungsverteilung der Entwässerungssegmente im Gebiet Rurrenabaque.

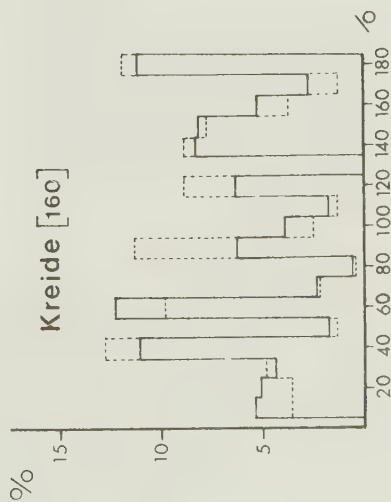
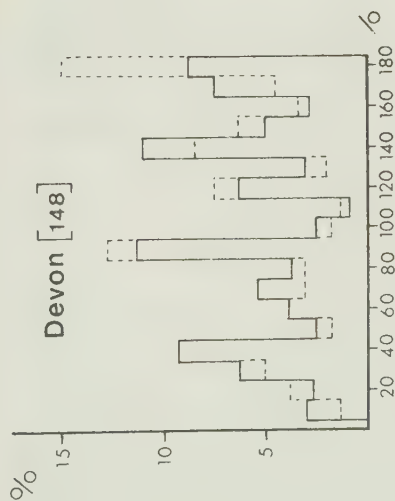
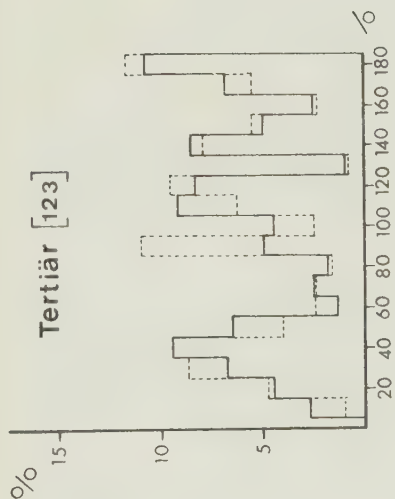


Fig. 29: Richtungsverteilung der im Luftbild gemessenen Entwässerungssegmente im Gebiet Rurrenabaque. Aufgetragen sind die prozentualen Längen (durchgezogene Linie) und Anzahlen (gestrichelte Linie) pro Gradklasse und die Gesamtanzahl der Messungen.

Bemerkenswert ist zudem eine stärkere Ausbildung der Maxima-Minima-Verteilungen in den Histogrammen des Entwässerungsnetzes gegenüber den Histogrammen des Kluftnetzes, was eine intensivere Differenzierung der einzelnen Richtungen bewirkt.

Wie auch in den Histogrammen der Gebiete Huayna Potosí und Apolo prägen gegenüber den Längenverteilungen die Anzahlverteilungen die Maxima-Minima-Werte besonders deutlich. Sie sind aus diesem Grund für die Verdeutlichung der Richtungsmaximaverteilungen gut geeignet.

Nach Tabelle 19 lassen die Entwässerungsdichten (D_E) in den drei geologischen Einheiten die geringsten Unterschiede untereinander erkennen. Der Grund dafür ist in der dichten, geschlossenen Vegetationsbedeckung in diesem Gebiet zu sehen, die alle feineren Entwässerungssegmente überdeckt.

Auch die Entwässerungsform der jeweiligen Meßbereiche ist untereinander nicht wesentlich verschieden. Man erkennt, daß die weichen devonischen Schiefer und die flach einfallenden Sandstein-Schiefer-Serien des Tertiärs typische dendritische bis subdendritische Entwässerungsformen aufweisen, während die steil einfallenden kretazischen Sandsteine eine mehr subparallele Form ihres Entwässerungsnetzes erkennen lassen.

Tabelle 15: Vergleich der Kluftmeßbereiche der im Luftbild gemessenen Klüfte mit dem SPEARMAN Rang-Korrelations-Test (R_s) und dem Chi-Quadrat-Test (χ^2/A und χ^2/L) im Gebiet Rurrenabaque
($R_s = 0,399$ bei $\alpha = 0,05$ / $\chi^2 = 27,6$ bei $\alpha = 0,01$)

Vergleich	R_s	χ^2/A	χ^2/L	Art	Lithologie
Devon-Kreide	0,2329	89,8	49,1	Kluft	Schiefer-Sandstein
Kreide-Tertiär	0,6520	21,6	60,5	Kluft	Sandstein-Sandstein
Devon-Tertiär	0,3908	47,8	53,2	Kluft	Schiefer-Sandstein

Tabelle 16: Vergleich der Entwässerungsbereiche im Luftbild mit dem SPEARMAN Rang-Korrelations-Test (R_s) und dem Chi-Quadrat-Test (χ^2/A und χ^2/L) im Gebiet Rurrenabaque
($R_s = 0,399$ bei $\alpha = 0,05$ / $\chi^2 = 27,6$ bei $\alpha = 0,01$)

Vergleich	R_s	χ^2/A	χ^2/L	Art	Lithologie
Devon-Kreide	0,7277			Entw.	Schiefer-Sandstein
Kreide-Tertiär	0,5175			Entw.	Sandstein-Sandstein
Devon-Tertiär	0,7755	28,4	15,0	Entw.	Schiefer-Sandstein

Tabelle 17: Vergleich der Kluft- und Entwässerungsnetze in ihren Längen- und Anzahlverteilungen mit dem SPEARMAN Rang-Korrelations-Test (R_s) im Gebiet Rurrenabaque
($R_s = 0,399$ bei $\alpha = 0,05$)

Vergleich	R_s	Art	Stratigraphie	Lithologie
Entw./Kluft	0,2172	Länge	Tertiär	Sandstein
Entw./Kluft	0,0676	Länge	Kreide	Sandstein
Entw./Kluft	-0,0707	Länge	Devon	Schiefer
Entw./Kluft	0,2003	Anzahl	Tertiär	Sandstein
Entw./Kluft	-0,1534	Anzahl	Kreide	Sandstein
Entw./Kluft	-0,1940	Anzahl	Devon	Schiefer

Tabelle 18: Vergleich der Längen- und Anzahlverteilungen (L / A) der Kluft- und Entwässerungsnetze mit dem SPEARMAN Rang-Korrelations-Test (R_s) und dem Chi-Quadrat-Test (χ^2/L und χ^2/A) im Gebiet Rurrenabaque

($R_s = 0,399$ bei $\alpha = 0,05$ / $\chi^2 = 27,6$ bei $\alpha = 0,01$)

Vergleich	R_s	χ^2/A	χ^2/L	Art	Stratigraphie	Lithologie
I / A	0,9080	5,3	5,7	Kluft	Tertiär	Sandstein
L / A	0,8733	14,6	8,7	Kluft	Kreide	Sandstein
L / A	0,9311	4,8	4,6	Kluft	Devon	Schiefer
I / A	0,7550	14,5	14,2	Entw.	Tertiär	Sandstein
L / A	0,8122	9,3	9,8	Entw.	Kreide	Sandstein
L / A	0,7791	12,1	11,4	Entw.	Devon	Schiefer

Tabelle 19: Entwässerungsparameter im Gebiet Rurrenabaque

Meßber.	Einheit	Untergrund	Form	D_E	Richtungsmaxima
I - II	Tertiär	Sandstein	subdendrit.	5,03	40/ -/90/120/140/180
III-IV	Kreide	Sandstein	subparallel	5,63	40/60/90/120/140/180
V - VI	Devon	Schiefer	dendritisch-subdendrit.	5,41	40/65/90/120/140/180

8.5. Gegenüberstellung der Kluft- und Entwässerungsnetze in den drei Bearbeitungsgebieten

A) Kluftnetz

Bei einem zusammenfassenden Vergleich der Gesamtkluftbereiche der drei Bearbeitungsgebiete zeigt sich eine Verdeutlichung der in den Einzelgebieten gewonnenen Erkenntnisse.

Insgesamt wurden in den Luftbildern der drei Gebiete 2403 Klüfte gemessen, die sich wie folgt verteilen (Fig.40):

- a) Huayna Potosí: 822 Klüfte
- b) Apolo : 746 Klüfte
- c) Rurrenabaque : 835 Klüfte

Bei der Analyse des Histogramms "Gesamt" erkennt man eine starke Ausgewogenheit der Kluftverteilung. Dennoch lassen sich in diesem und verstärkt in den anderen drei Histogrammen sehr gut übereinstimmende Maxima bestimmter Kluftrichtungen beobachten. So treten deutlich die 50° -, 90° -, 140° - und 180° -Richtungen hervor.

Die gute Übereinstimmung in der Betonung bestimmter Kluftrichtungen in allen drei Gebieten deutet auf eine gemeinsame tektonische Beanspruchung hin. Da die drei Untersuchungsgebiete so ausgewählt wurden, daß sie in etwa einen Querschnitt durch den nordbolivianischen Andenraum darstellen, erstrecken sich demnach diese gemeinsamen tektonischen Beanspruchungspläne über das gesamte nordbolivianische Andengebiet. Ausgenommen sind jedoch der Altiplano und das östliche Beni-Tiefland, da dort keine, bzw. nur wenige Klüfte gemessen werden konnten.

Die Klüfte in den dominierenden Richtungen N/S-E/W und NW/SE-NE/SW bilden zwei korrespondierende Kluftpaare, die jeweils ca. 90° auseinanderklaffen.

Nach AHLFELD (1970), PLAFKER (1962, 1964), RADELLI (1966) u.a. wurden diese dominierenden Richtungen durch präkambrisch an-

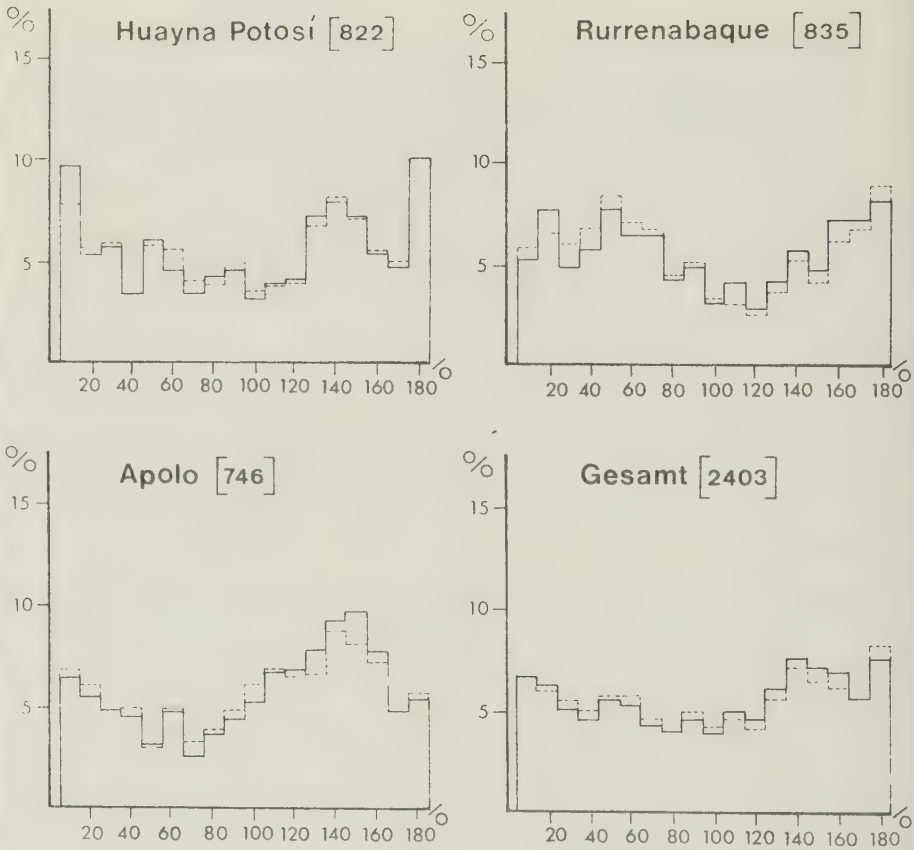


Fig.40: Richtungsverteilung der im Luftbild gemessenen Klüfte in allen drei Gebieten. Aufgetragen sind die prozentualen Längen (durchgezogene Linie) und Anzahlen (gestrichelte Linie) pro Gradklasse und die Gesamtanzahl der Messungen.

gelegte, tiefgreifende Lineamente hervorgerufen. Die N/S-Richtung ist im Streichen der Anden ebenso wie die NW/SE-Richtung zu erkennen. Die E/W-Richtung paust sich dagegen in einer groß angelegten Schwächezone (Poopoo-Linie/Ichilo-Linie) im mittleren Teil Boliviens durch. Auch die tiefgreifenden Störungen Palca, Coniri, Chacarilla, Chiriquiña verlaufen in NW/SE- bzw. N/S-Richtung. Nach RADELLI(1966) sind die präkambrischen Lineamente im Satellitenbild (Gemini 5) gut zu verfolgen.

In der Tabelle 20 sind neben den Richtungsverteilungen der Klüfte noch weitere Kluftparameter aufgelistet. So erkennt man gut, daß die mittlere Länge der Klüfte in den beiden Gebieten Apolo und Rurrenabaque ziemlich einheitlich um den Wert 500-600 m schwanken, während sie im Gebiet Huayna Potosí insgesamt ca. 100-200 m kürzer sind.

Auch die Werte für die Klüftigkeit ($K = \text{Kluftanzahl/Flächeneinheit}$) und Kluftdichte ($D_K = \text{Kluftlänge/Flächeneinheit}$) weisen in den Gebieten Apolo und Rurrenabaque eine große Ähnlichkeit innerhalb der einzelnen Gebiete und untereinander auf.

Im Gebiet Huayna Potosí dagegen differieren die K - und D_K -Werte beträchtlich. Den sehr geringen Kluftwerten in den silurischen Schiefern stehen relativ hohe Kluftwerte in den beiden geologischen Einheiten Ordoviz und Granit gegenüber.

Diese hohen Werte sind bedingt durch die lithologische Ausbildung dieses Gesteins (hart und spröde), durch eine starke tektonische Beanspruchung (Überschiebung des ordovizischen Schiefers durch den Granit) und durch die steilen morphologischen Formen (schnelle Ausräumung der Klüfte).

Bemerkenswert ist zudem die immer stärkere Angleichung der Längenverteilung an die Anzahlverteilung mit der Zunahme der Kluftanzahl. Dieses Ergebnis bestätigt frühere Arbeiten von HENDERSON(1960), RENNER (1968) und STOCK (1972).

Tabelle 20: Klüftigkeit (K) und Klufstdichte (D_K) in den einzelnen stratigraphischen Einheiten der drei Gebiete

Einheit	Fläche (km^2)	Anzahl	Länge (km)	Mittl. Länge (km)	K (km^{-2})	D_K (km^{-1})
<u>Huayna Potosí</u>						
Trias (Granit)	10	248	101,8	0,41	24,8	10,2
Silur	100	125	36,9	0,30	1,3	0,4
Ordoviz	23	440	188,4	0,42	19,5	8,2
Gesamt	133	822	327,1	0,38	15,2	6,3
<u>Apolo</u>						
Kreide	122	282	167,5	0,60	2,3	1,2
Devon	38	112	55,6	0,50	3,0	1,4
Ordoviz	192	352	203,3	0,56	1,8	0,9
Gesamt	352	746	426,4	0,55	2,4	1,2
<u>Rurrenabaque</u>						
Tertiär	92	215	122,6	0,59	2,3	1,2
Kreide	99	432	219,6	0,51	4,4	2,2
Devon	52	188	93,1	0,50	3,6	1,8
Gesamt	243	835	435,3	0,53	3,4	1,7

B) Entwässerungsnetz

Bei einer Gegenüberstellung der Entwässerungsnetze der einzelnen Gebiete und ihrer Zusammenfassung in Histogrammen zeigt sich auch hier, daß die in den einzelnen Gebieten gewonnenen Erkenntnisse sich bestätigen und sogar noch deutlicher hervortreten.

Es wurden insgesamt 1587 Entwässerungssegmente gemessen, die sich wie folgt auf die drei Bearbeitungsgebiete verteilen (Fig.41):

- a) Huayna Potosí: 629 Segmente
- b) Apolo : 527 Segmente
- c) Rurrenabaque : 431 Segmente

Man erkennt im Gegensatz zu den Kluftnetzverteilungen eine stärkere Betonung der Maxima-Minima-Richtungen und damit eine intensivere Ausprägung derselben in den Entwässerungsnetz-Histogrammen.

Ebenso erfolgt mit der Zunahme der Entwässerungssegmente keine Angleichung der Anzahlverteilungen an die Längenverteilungen, wie sie in den Kluftnetzen zu beobachten ist. Man erkennt dagegen eine verstärkte Herausarbeitung der Maxima-Minima-Verteilungen.

Alle drei Bearbeitungsgebiete lassen eine z.T. gute Übereinstimmung der Richtungsverteilung der einzelnen Entwässerungsnetze in den Histogrammen erkennen. So treten vor allem die 40° -, 60° -, 90° -, 140° - und 180° -Richtungen hervor. Hinzu kommt noch die 120° -Richtung, die jedoch im Gebiet Huayna Potosí nicht zu beobachten ist. Die Ursache darin liegt in der tektonischen Ausbildung des Gebietes.

Wertet man die 40° - und die 60° -Richtung als eine "Spreizung" der 50° -Richtung, so erhält man bei der Entwässerungsnetzanalyse im gesamten Bearbeitungsgebiet analog der Kluftnetzanalyse die Hauptrichtungen: NS-EW und NW/SE-NE/SW. Dieses Ergebnis zeigt eine deutliche Beeinflussung des Entwässerungs-

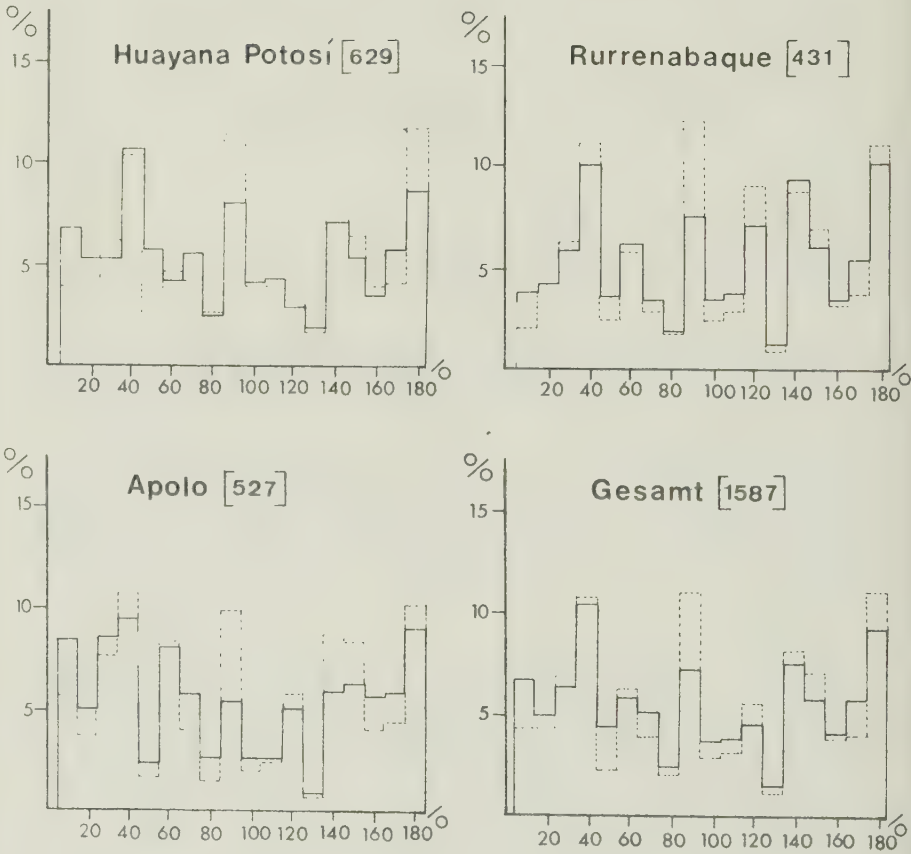


Fig.41: Richtungsverteilung der im Luftbild gemessenen Entwässerungssegmente in allen drei Gebieten. Aufgetragen sind die prozentualen Längen (durchgezogene Linie) und Anzahlen (gestrichelte Linie) pro Gradklasse und die Gesamtanzahl der Messungen.

netzes durch die vorgegebene Tektonik; eine Erkenntnis, die erst besonders deutlich in den Übersichtshistogrammen zu beobachten ist.

Bei einem Vergleich der verschiedenen Entwässerungsdichten (D_E) und mittleren Längen (L_M) in den einzelnen Entwässerungsnetzen erkennt man eine deutliche Beeinflussung dieser Werte durch die lithologische Ausbildung des Untergrundes, durch seine morphologische Form und durch die Vegetation.

Die Tabelle 21 läßt erkennen, daß die dichte, geschlossene Vegetationsbedeckung im Gebiet Rurrenabaque eine Vereinheitlichung der D_E -Werte in den Schiefern und Sandsteinen um den Wert $D_E=5 \text{ (km}^{-1}\text{)}$ bewirkt, da alle kleineren "finger tip channels" in den Entwässerungsnetzen überdeckt werden und somit nicht in die statistische Auswertung miteingehen.

Auch die mittleren Längen weisen in diesem Gebiet keine, bzw. nur unwesentliche Unterschiede auf, was ebenfalls auf die dichte Vegetationsbedeckung zurückzuführen ist.

Im Gebiet Apolo kann man dagegen eine Beeinflussung der D_E -Werte durch die lithologische Ausbildung des Untergrundes beobachten. So zeigen die devonischen Schiefer den höchsten Wert ($D_E=7,02 \text{ km}^{-1}$), während die kretazischen Grobsandsteine die niedrigste Entwässerungsdichte ($D_E=5,20 \text{ km}^{-1}$) aufweisen.

Die mittlere Länge (L_M) der Entwässerungssegmente in diesem Gebiet ist dagegen abhängig von der Lithologie und der morphologischen Form des jeweiligen Gesteins. Man beobachtet in den steile, schroffe Wände bildenden Sandsteinen der Kreide deutlich höhere L_M -Werte als in den anderen beiden Meßbereichen.

Die Entwässerungsparameter D_E und L_M im Gebiet Huayna Potosí hängen von verschiedenen Faktoren ab. So erkennt man in den quartären Moränensedimenten den höchsten L_M -Wert ($L_M=510 \text{ m}$) und den niedrigsten D_E -Wert ($D_E=3,01 \text{ km}^{-1}$) der drei Bearbeitungsgebiete. Es handelt sich hier um ein noch junges, nicht ausgereiftes Entwässerungssystem.

Die Beeinflussung des Entwässerungssystems durch die lithologische Ausbildung des Untergrundes zeigt sich auch im Gebiet Huayna Potosí an den relativ hohen D_E -Werten ($D_E=6,21$ bis $7,49 \text{ km}^{-1}$) der ordovizischen, silurischen und devonischen Schiefer, bzw. Feinsandsteine. Dagegen läßt der tertiäre Grobsandstein deutlich niedrigere D_E -Werte ($D_E=4,42 \text{ km}^{-1}$) erkennen.

Eine Abhängigkeit der Entwässerungsdichten von den tektonischen Gegebenheiten des Untergrundes (hohe Klüftigkeit und Kluftdichte lassen auf eine hohe Entwässerungsdichte schließen) zeigt sich in diesem Gebiet in den ebenfalls relativ hohen D_E -Werten ($D_E=6,56 \text{ km}^{-1}$) auf den granitischen Intrusiva.

Dagegen läßt der gegenüber den anderen Meßbereichen -ausgenommen sind die quartären Moränensedimente- deutlich höhere I_M -Werte ($I_M=430 \text{ m}$) des schroffe, steile Wände bildenden Granites auf eine Abhängigkeit des I_M -Wertes von der morphologischen Form des Untergrundes schließen, da auch die weichen, nur sanft gewellten silurischen Schiefer den niedrigsten I_M -Wert ($I_M=270 \text{ m}$) aufweisen.

Bemerkenswert ist, daß ROLAND (1973) in den Sandsteinen im Ti-besti-Gebirge zu ähnlichen D_F -Werten gekommen ist. Dagegen liegen seine D_E -Werte für ein granitisches Gestein ($D_E=4,28 \text{ km}^{-1}$) deutlich niedriger, was wahrscheinlich auf eine geringere tektonische Inanspruchnahme desselben zurückzuführen ist. Auch KRONBERG (1967b) gibt für einen massigen Granit geringere D_E -Werte an ($D_E=4,0$ bis $6,0 \text{ km}^{-1}$).

Tabelle 21: Vergleich der Entwässerungsdichten (D_E) und mittleren Längen (L_M) der Entwässerungsnetze in den drei Bearbeitungsgebieten

Einheit	Fläche (km ²)	Anzahl	Länge (km)	L_M (km)	D_E (km ⁻¹)	Untergrund
<u>Huayna Potosí</u>						
Quartär	9,42	55	28,4	0,51	3,01	Moränen
Tertiär	6,28	80	27,8	0,34	4,42	Sandstein
Trias	3,14	47	20,6	0,43	6,56	Granit
Devon	3,14	74	22,0	0,29	7,00	Sandstein(Fein-)
Silur	9,42	257	70,6	0,27	7,49	Schiefer/Feinsdst
Ordoviz	6,28	116	39,0	0,33	6,21	Schiefer/Feinsdst.
Gesamt	37,68	629	208,4	0,36	5,78	
<u>Apolo</u>						
Kreide	6,28	118	32,7	0,27	5,20	Sandstein
Devon	6,28	238	44,1	0,18	7,02	Schiefer
Ordoviz	6,28	171	34,0	0,19	5,41	Sandstein/Sch.
Gesamt	18,84	527	110,8	0,21	5,88	
<u>Rurrenabaque</u>						
Tertiär	6,28	123	31,6	0,25	5,03	Sandstein
Kreide	6,28	160	35,4	0,22	5,63	Sandstein
Devon	6,28	148	34,0	0,22	5,41	Schiefer/Feinsdst.
Gesamt	18,84	431	101,0	0,23	5,36	

9. ZUSAMMENFASSUNG

=====

Die vorliegende photogeologische Arbeit behandelt einen Vergleich wichtiger im Luftbild direkt oder indirekt erkennbarer Einflußgrößen, wie z.B. die Geologie, die Morphologie, die Vegetation und das Klima.

Der Vergleich wurde anhand von drei verschiedenen Gebieten durchgeführt, die einen Querschnitt durch die nordwestlichen Regionen Boliviens darstellen. Es sind dies die Gebiete:

- 1) HUAYNA POTOSÍ (Altiplano/Kordillere)
- 2) APOLO (Subandine Zone)
- 3) RURRENABAQUE (Subandine Zone/Tiefebene)

Daneben beschäftigt sich die Arbeit nicht nur mit der Bearbeitung geologisch nahezu unbekannter Gebiete Boliviens mit Hilfe der Photointerpretation, sondern behandelt auch die Messung tektonischer, lithologischer und morphologischer Daten (Kluft- und Entwässerungsnetz), ihre statistische Weiterverarbeitung und vergleichende Gewichtung.

Folgende quantitative Auswertungsmethoden wurden in dieser Arbeit verwendet und ihre Ergebnisse kritisch diskutiert:

- 1) Richtungsverteilung des Kluftnetzes im Gelände und im Luftbild
- 2) Messung der Kluftdichte (D_K), der Klüftigkeit (K) und der mittleren Kluftlängen
- 3) Richtungsverteilung der Entwässerungssegmente im Luftbild
- 4) Messung der Entwässerungsdichte (D_E) und der mittleren Längen der Entwässerungssegmente
- 5) Korrelation der Richtungsverteilung der Kluft- und Entwässerungsnetze
 - a) SPEARMAN Rang-Korrelations-Test
 - b) Chi-Quadrat-Test

Die untersuchten morphologischen Formen umfassen die Hochebene des Altiplano, das Hochgebirge der Kordillere, die Täler des

östlichen Andenabfalls (Yungas), das Vorgebirge und die Beni-Tiefebene.

Die Klimabereiche erstrecken sich von der Ebene des Altiplano, wo der Niederschlag unbedeutend ist und die durchschnittliche Jahrestemperatur weniger als 5°C beträgt, bis zum feuchten Tropenschungel.

Das Gebiet Hayna Potosí liegt in der Vegetationsregion "Paramo oder feuchte Puna", während die Gebiete Apolo und Rurrenabaque in den "Tropischen Regenwäldern des Andenabfalls und der Fußzone" zu finden sind.

Die Schichtfolge im Gebiet Huayna Potosí umfaßt die folgenden stratigraphischen Einheiten:

- h) Quartär (Lockersedimente)
- g) Tertiär (Sandstein/Konglomerat)
- f) Kreide (Sandstein)
- e) Trias (Granit)
- d) Devon (Feinsandstein)
- c) Silur (Schiefer)
- b) Oberstes Ordoviz (Feinsandstein)
- a) Ordoviz (Schiefer)

Die Tektonik in diesem Gebiet ist durch verschiedene, zeitlich aufeinanderfolgende Phasen der Deformation gekennzeichnet.

Im Gebiet Apolo konnten folgende stratigraphische Einheiten anskartiert werden:

- d) Quartär (Lockersedimente)
- c) Kreide (Sandstein)
- b) Devon (Sandstein/Schiefer)
- a) Ordoviz (Schiefer)

Es handelt sich im Bearbeitungsgebiet um ältere Rumpfflächen, die entlang von gebirgsparallelen Verwerfungen unterschiedlich stark gehoben wurden.

Das Gebiet Rurrenabaque wird durch folgende Sedimente aufgebaut:

- d) Quartär (Lockersedimente)
- c) Tertiär (Sandstein/Schiefer)
- b) Kreide (Sandstein)
- a) Devon (Schiefer)

Dieses Gebiet liegt im östlichen, bereits im Flachland gelegenen Abschnitt der nördlichen subandinen Zone. Es zeigt einen Wechsel von schmalen, asymmetrischen Sätteln und breiten Mulden.

In den drei Bearbeitungsgebieten ist bei der Gegenüberstellung der Kluft- und Entwässerungsnetze eine gute Übereinstimmung der Richtungsverteilungen zu beobachten. Die gemessenen Klüfte (2403) und Entwässerungssegmente (1587) weisen in ihren Verteilungen dominierende Richtungen auf: N/S-E/W und NE/SW-NW/SE.

Da die drei Untersuchungsgebiete so ausgewählt wurden, daß sie in etwa einen Querschnitt durch die nordwestlichen Regionen Boliviens darstellen, erstrecken sich demnach die tektonischen Beanspruchungspläne über das gesamte nordbolivianische Andengebiet und lassen das Vorhandensein alter, präkambrisch angelegter Lineamente erkennen.

10. SUMMARY =====

This photogeological study presents a comparison of important data which are visible -directly or indirectly- on aerial photographs as for instance geological, morphological, vegetational and climatological features.

The comparison was carried out in three different regions which comprise a cross-section through the northwest regions of Bolivia:

- 1) HUAYNA POTOSÍ (Altiplano/Cordillere)
- 2) APOLO (Subandine Zone)
- 3) RURRENABAQUE (Subandine Zone/Lowlands)

This study is not only concerned with regions of Bolivia which are almost unknown from the geological standpoint using photo-interpretation, but it also deals with the measurement of tectonological, lithological and morphological data (fracture system/drainage system), its statistical processing and relative importance.

The following quantitative methods of analysis were used in this study and its results discussed critically:

- 1) Distribution of directions of the fracture system in the field and aerial photographs;
- 2) Measurement of fracture density (D_K), fracture frequency(K) and average lengths of fractures;
- 3) Distribution of directions of the drainage system in aerial photographs;
- 4) Measurement of drainage density (D_F) and the average lengths of the drainage channels;
- 5) Correlation of the distribution of directions of the fracture and drainage systems
 - a) SPEARMAN rank-correlation-test
 - b) Chi-square-test

The three regions studied show a good correlation of the distribution of directions comparing the fracture and drainage systems.

The measured fractures (2403) and drainage channels (1587) present dominating directions: N/S-E/W and NW/SE-NE/SW.

The three regions studied were chosen in order to represent a cross-section through the northwest regions of Bolivia. Accordingly the tectonic models of the single regions can be extrapolated for the whole North-Bolivian Andes. Besides they show the existence of older Precambrian lineaments.

11. RESUMEN

=====

En el presente trabajo fotogeológico se hace una comparación de los factores mas importantes reconocibles directa o indirectamente en la foto aerea, tales como la geología, la morfología, la vegetación y el clima.

Esta comparación se efectuó en tres diferentes zonas de Bolivia, las cuales representan aproximadamente un perfil transversal a lo largo de una parte del noroeste boliviano. Las zonas son las siguientes:

- 1) HUAYNA POTOSÍ (Altiplano-Cordillera)
- 2) APOLO (Zona subandina)
- 3) RURUPABAQUE (Zona subandina-Llanos noroccidentales)

Por otra parte, el trabajo no solo se limita a la fotointerpretación de regiones casi geologicamente desconocidas de Bolivia, sino que trata tambien de la obtención de datos tectónicos, litológicos y morfológicos (sistema de diaclasamiento, sistema de drenaje, etc.) su interpretación estadística y su respectiva comparación.

En el estudio se realizaron las siguientes investigaciones:

- 1) Medida de la dirección de las diaclasas en el terreno y en las fotos aereas y su distribución
- 2) Medida de la densidad del diaclasamiento por km^2 (D_K), medida del largo de las diaclasas por km^2 (K) y medida del largo medio de las mismas.
- 3) Medida de la dirección de los diferentes segmentos de la red de drenaje en la foto aerea.
- 4) Medida de la densidad de drenaje (D_E) y medida del largo medio de los segmentos de la red de drenaje.
- 5) Correlación de las distribuciones de dirección de las redes de diaclasamiento y de drenaje:
 - a) Correlación según el SPEARMAN rank-correlation-test
 - b) Correlación según el Chi-square-test

En las tres zonas estudiadas, la comparación de las redes de diaclasamiento y de drenaje permiten establecer una buena coincidencia de sus distribuciones de dirección. Las diaclasas medidas (2403) y los segmentos de red de drenaje medidos (1587) muestran en su distribución las siguientes direcciones predominantes: N-S; E-W; NE-SW y NW-SE.

Por razón de que la tectónica es similar en tres zonas elegidas, las cuales como ya se mencionó, forman un perfil mas o menos transversal a la zona andina de una parte del noroeste boliviano, parece valedero extrapolar ésta a todo el norte de la zona andina boliviana. Ella permite reconocer la existencia de lineamientos antiguos del precámbrico.

12. LITERATURVERZEICHNIS

12.1. Literatur zur regionalen Geologie

- APCF, J. & MONTES DE OCA, I.: Estudio preliminar sobre el deslizamiento de Villa Gualberto Villaroel, La Paz. - Serv.Geol.Bol., Circular Informativa, 9, 13 S., La Paz 1965
- AMHREID, F.: Zinnführende Pegmatite in der Cordillera Real. - Metall & Erz, 23, 420-424, Stuttgart 1926
- Geología de Bolivia. - Rev.Museo de la Plata (nueva serie), Sección Geología III, 5-370. La Plata 1946
- Die Metallprovinz des Altiplano. - N. Jb. Mineral., Abh., 85, 1-58, Stuttgart 1953
- Die zonare Verteilung der Erzlagerstätten der bolivianischen Metallprovinz. - N. Jb. Mineral., Abh., 91, (Festband Schneiderhöhn), 329-350, Stuttgart 1957
- Neue Erkenntnisse über Stratigraphie und Tektonik Boliviens. - N.Jb.Mineral., Mh., 1962, 293-303, Stuttgart 1962a
- Problemas de Sedimentación en el Altiplano. - IBP, 3, 2, 7-9, La Paz 1962b
- Metallogenetic Epochs and Provinces of Bolivia. - Mineralium Deposita, 2, 291-311, Berlin/Heidelberg/New York (Springer), 1967
- Zur Tektonik des andinen Bolivien. - Geol. Rdsch., 59, 3, 1124-1140, Stuttgart 1970
- Geología de Bolivia. - Enciclopedia Boliviana, 190 S., (Los Amigos del Libro), La Paz 1972

- AHLFELD, F.: Geografía Física de Bolivia. - Enciclopedia Boliviana, 248 S., (Los Amigos del Libro), La Paz 1973
- AHLFELD, F. & BRANISA, I.: Geología de Bolivia. - IBP, (Verlag Don Bosco), 245 S., La Paz 1960
- AHLFELD, F. & MOSEBACH, R.: Über Alkaligesteine in der bolivianischen Ostkordillere. - N.Jb.Mineral., A 69, 388-414, Stuttgart 1935
- AHLFELD, F. & SCHNEIDER-SCHERBINA, A.: Los yacimientos minerales y de Hidrocarburos de Bolivia. - Depto.Nac.Geol., 5, 388 S., La Paz 1964
- ANTEZANA, O.: Clima de Bolivia según el sistema de Thornthwaite. - Rev.Fac.Agronomía, 24, 161-191, La Plata (Argentinien) 1958
- ASCARRUNZ, R.: Geología de la Provincia Pacajes. - Tesis de Grado, Facultad de Geología - UMSA, 16, La Paz 1962
- BARB, J.P. et al.: Relations entre tectonique, métamorphisme et mise en place d'un granite éohercynien a deux micas dans la cordillère real de bolivie (Massif de Zongo-Yani). - ORSTOM, ser. Géol., 6, 1, 3-18, La Paz 1974
- BARTH, E.: Reconnaissance report of the Geology of the Upper Beni Region. - Dep.Min.Petr. (Min. Ind.), La Paz 1926
- BARTH, W.: Die geowissenschaftliche Literatur Boliviens in den Jahren 1960-1971: Ein Überblick. - Zbl.Geol.Paläont., Teil 1, 1972 1/2, 100-130, Stuttgart 1972
- BARTHEL, K.W. & BARTH, W.: Paleocologic specimens from the Devonian of Bolivia. - N.Jb.Geol.Paläont., Mh., 1972, 10, 573-581, Stuttgart 1972
- BISCHOFF, G.: Die Arbeiten der Deutschen Geologischen Mission in Bolivien. - Bericht No.50, DGMB, 90 S., La Paz 1963

- BOTELLO, R.: Estudio Geológico de la Region Alto Beni, Faja Subandina del Norte. - Tesis de Grado, Facultad de Geología - UMSA, 99, La Paz 1967
- BRANDI-GIESSEN, I.: Perfil Geológico La Paz-Rurrenabaque (con mapa geológico). - Min. (Cam.Nal.de Min.), 2, 10-12, La Paz 1955 und Min. (Cam.Nal. de Min.), 6-9, 33-43, La Paz 1957
- BRANISA, I.: Los Fósiles guías de Bolivia. I.Paleozoico. - Serv.Geol.Bol., 6, 282 S., La Paz 1965
- Excursión Geológica a la zona de Calamarca. - Soc.Geol.Bol., 7, 15-18, La Paz 1968
- El sistema Silúrico en Bolivia: Estratigrafía, Faunas y Límites. I.El Límite entre el Silúrico y el Devónico. - Soc.Geol. Bol., 12, 22-70, La Paz 1969
- La Formación Yecua y los problemas que plantea. - Soc.Geol.Bol., 13, 20-29, La Paz 1970
- BRANISA, L., GRAMBAST, R. & HOFFSTETTER, R.: Quelques précisions nouvelles, d'après les Charophytes, sur d'âge du groupe Puca (Crétacé-Paléogène, Bolivie). - Soc.Géol.France, C.R., 8, 321-322, Paris 1969
- BRANISA, L., HOFFSTETTER, R., FRENEIX, S., ROMAN, J. & SORNAY, J.: Nouvelle contribution à l'étude de la paléontologie et de l'âge du groupe Puca (Crétacé de Bolivie). - Bull.Mus.Nat. Hist.Natur., 2.Série, 38, 3, 301-310, Paris 1966
- BRANISA, I., HOFFSTETTER, R. & SIGNEUX, J.: Additions à la faune ichthyologique du Crétacé supérieur de Bolivie. - Bull.Mus.Nat.Hist.Natur., 2.Série, 36, 2, 279-297, Paris 1964

- BRAUN, O.: Die Gehölze Boliviens und ihre wirtschaftliche Nutzung. - Zentralblatt Stuttgart, Okt., Stuttgart 1964
- BULLMAN, O.: South American Graptolites; with a special reference to the Nordenskiöld Collection. - Arkiv för Zoologi. 22A, 3, 111 S., Uppsala 1931
- CANEDO-REYES, R.: Monografía sobre los petróleos de Caupolicán. Fuentes de información y generalidades. - Informes GXG-YPFB, 151, La Paz 1947
- Informe sobre la Geología de la Zona Petrolífera del Noroeste. - IBP, 1, 2, 9-32, La Paz 1960
- CASTAÑOS, A.: Interpretación sedimentológica de los afloramientos presentes en el curso superior del Río Beni, Depto. La Paz, Bolivia. - Serv.Geol.Bol., 18, 91-109, La Paz 1972
- CARRASCO, R.: Contribución al conocimiento geológico del Terciario Altiplánico, zona Comanche, Prov. Pacajes. - Tesis de Grado, Facultad de Geología - UMSA, 22, La Paz 1962
- GLARK, A.H. & FARRAR, E.: The Bolivian tin provence: Notes on the available geochronological data. - Econ. Geol., 68, 102-116, Lancaster/Pas. 1973
- COCA, A.: Estudio Geotécnico; Zona Tuní-Condoriri. - Tesis de Grado, Facultad de Geología - UMSA, 220, La Paz 1972
- DAROCA, E.D.: Milluni, su Geología. - Tesis de Grado, Facultad de Geología - UMSA, 134, La Paz 1968
- DÁVILA, J. & PONCE DE LEON, V.: La sección del Río Inambari en la faja subandina del Perú y la presencia de sedimentitas de la formación Cancañiri (Zapla) del Silúrico. - Rev.Tca.Petrol.Fisc. Bolivia, 1, 1, 67-85, La Paz 1971

- DAVILA, J. & RODRÍGUEZ, G.E.: El sistema Devónico de Bolivia y el problema de su base. - IBP, 7, 2, 28-46, La Paz 1967
- DAVILA, J., VARGAS, C. & PONCE DE LEON, V.: Informe sobre la geología del Bloque Andino Noroccidental y la faja subandina del Norte. - YPFB (Informe inédito), La Paz 1965
- DIAZ, H.: Contribución al conocimiento geológico de las provincias Caupolicán e Itturralde. - YPFB (Informe inédito), La Paz 1956
- Comunicación acerca de las condiciones geológicas presentes en el curso superior del Rio Beni. - Bol.Tec. YPFB, 1, 2, 21-27, La Paz 1959
- DOBROVOLNY, E.: Geología del Valla de La Paz.- Depto.Nac. de Geol., 3, 153 S., La Paz 1962
- Un torrente de barro de gran volumen; post glacial en el valle de La Paz, Bolivia. - Soc.Geol.Bol., 12, 5-17, La Paz 1969
- ELIENBERGER, J.F.: Possibilités d'intensification de l'exploitation des paturages dans la pampaisla d'Ixiamas, Province Itturralde (Bolivie). - Institut d'élevage et de médecine vétérinaire des pays tropicaux, 91 S., Paris 1972
- EVERNDEN, J.: Edades absolutas de algunas rocas ígneas de Bolivia por el método Potásio-Argón. - Soc.Geol.Bol., Noticiario No.2, 4 S., La Paz 1961
- EVERNDEN, J., KRIZ, S. & CHERRONI, C.: Correlación de las formaciones terciarias de la cuenca altiplánica a base de edades absolutas determinadas por el método potásio-argón. - Serv. Geol.Bol., Hoja Informativa No.1, La Paz 1966

- FRAKES, L.A. & CROWELL, J.C.: Late Paleozoic Glaciation: I, South America. - Geol.Soc.Amer.Bull., 80, 1007-1042, Boulder/Col. 1969
- FREYDANCK, H.G.: Informe sobre "Actividades de exploración en la zona aurífera norte de La Paz". - Serv.Geol.Bol., Informes, La Paz 1964
- Informe "Los placeres auríferos al pie de la Cordillera Oriental de Bolivia. - Serv. Geol.Bol., Informes, (2 Bde.), La Paz 1965 und 1966
- FRICKE, W. u. A.: Geologische Untersuchungen im südwestlichen Vorland der Cordillera Tres Cruces (Quimsa Cruz) und im Massiv der Cordillera Santa Vera Cruz, Bolivien. - Deutsche Geologische Mission in Bolivien, 49, 62 S., La Paz 1963
- Geologische Untersuchungen im zentralen Teil des bolivianischen Hochlandes nordwestlich von Oruro. - Geol.Jb., 83, 7-11/26-29, Hannover 1964
- FRICKE, W. & VOGES, A.: Beitrag zur Kenntnis der andinen Sedimentationsräume in Bolivien, Süd-Peru und Nord-Chile. - Geol.Jb., 85, 941-972, Hannover 1968
- GEOBOL: Investigaciones preliminares sobre la tectónica y metalogénesis en las cordilleras Real y Quimsa Cruz. - Serv.Geol.Bol., 9, 13-29, La Paz 1968
- GERTH, H.: Die Entwicklung der Orogene der Südamerikanischen Kordillere während des Mesozoikums. - Geol.Rdsch., 50, 619-630, Stuttgart 1960
- HARRINGTON, H.J.: Paleographic development of South America. - Bull.Amer.Assoc.Petrol.Geol., 46, 10, 1773-1814, Tulsa/Okla. 1962

- HARRINGTON, H.J.: Devonian of South America. - In: OSWALD, D.H. (Edit.): Intern.Symposium on the Devonian System (Calgary 1967), 1. - Alberta Soc.Petrol.Geol., 651-671, Calgary/Alberta 1967
- HUECK, O.: Die Wälder Südamerikas, ihre Ökologie, Zusammensetzung und wirtschaftliche Bedeutung. - 422 S., (G.Fischer), Stuttgart 1966
- JAUREGUI, J.: Estudio Geológico Minero de la Region Miluni-Zongo. - Tesis de Grado, Facultad de Geología - UMSA, 142, La Paz 1969
- KEENAN, J.: Los trabajos realizados por Gulf Oil en Bolivia. - Soc.Geol.Bol., 9, 8-24, La Paz 1969
- KOSLOWSKI, R.: Faune Dévonienne de Bolivie. - Ann.de Paléontologie, 12, Paris 1923
- KNIZ, S. & CHERRONI, C.: Diagramas correlativos de formaciones cretácicas del Sudoeste de Bolivia. - Serv. Geol.Bol., Hoja Informativa No.2, La Paz 1966
- LAMB, W.C. & TRUITT, P.: Geología del petróleo en el arena de Santa Cruz. - IBP., 4, 1-4, 12-39, La Paz 1963
- LJUNGGREN, P.: Las rocas graníticas del Huayna Potosí y el origen de los batolitos de la Cordillera Real. - Soc.Geol.Bol., 2, 7-8, La Paz 1961
- Los batolitos graníticos y la mineralización de la Cordillera Real, Bolivia. - YPFB, 4, 1, 7-17, La Paz 1962
- LJUNGGREN, P. & RADEILLI, L.: The origin of the granitic batholiths of the Cordillera Real, Bolivia. - Atti Soc.Ital.Sci.Natur., 103, Fasc.2, 101-114, Mailand 1964

- LOHMANN, H.H.: Un nuevo método para la determinación de la dirección del movimiento glacial, aplicado al Horizonte Zapla en el Gotlándico de Bolivia. - YPFB, 3, 3, 32-41, La Paz 1961
- Paläozoische Vereisungen in Bolivien. - Geol.Rdsch., 54, 1, 161-165, Stuttgart 1964
- Outline of Tectonic History of Bolivian Andes. - Amer.Assoc.Petrol.Geol.Bull., 54 5, 735-757, Tulsa/Okl. 1970
- LOHMANN, H.H. & BRANISA, L.: Estratigrafía y Paleontología del Grupo Puca en el Sinclinal de Miraflores-Potosí. - YPFB, 4, 2, 9-16, La Paz 1962
- LÓPEZ-MURILLO, H.: Acerca de la geología de las serranías subandinas del noroeste. - IBP, 7, 2, 14-27, La Paz 1967
- MARTÍNEZ, C.: Estructuras hercínicas afectadas por la tectónica andina en la Cordillera Real de Bolivia. - Soc.Geol.Bol., 18, La Paz 1972
- MARTÍNEZ, C. SUAREZ, R. & SUBIETA, T.: La cadena hercínica en la parte septentrional de la Cordillera Oriental de los Andes Bolivianos (Perfil La Paz - Alto Beni). - Serv.Geol.Bol., 15, 26-35, La Paz 1971
- MEYER, H.C. & MURILLO, J.E.: Sobre la Geología en las Provincias Aroma, Pacajes y Carangas (Investigaciones geológicas en la faja cuprífera altiplánica). - Depto.Nac.Geol., 1, 49 S., La Paz 1961
- MIRANDA, B.: Determinación de la edad radiométrica y facie metamórfica del batolito de Zongo. - Tesis de Grado, Facultad de Geología - UNSA, 219, La Paz 1971
- MONHEIM, F.: Junge Indianerkolonisation in Ostbolivien. - 135 S., (Westermann), Braunschweig 1965

- MOON, H.P.: The Geology and Physiography of the Altiplano of Peru and Bolivia. - The Percy Sladen Trust Expedition to lake Titicaca in 1937, Transactions Limean Soc., 3.Serie, Tomo I, London 1939
- NEWELL, N.D.: Geology of the Lake Titicaca region, Peru and Bolivia. - Geol.Soc.Amer.Memoir., 36, Baltimore 1949
- OPPENHEIM, V.: Diamonds in the Northeastern Bolivian Andes. - Econ.Geology, 38, 658-661, Urbana/Ill. 1943
- PADULA, E.L.: Valorización de las discordancias en la sierra subandina. - YPFB, Bol.Tec.II, 5, La Paz 1959
- PADULA, E.L. & REYES, F.C.: Contribución al léxico estratigráfico de las sierras subandinas. - YPFB, Bol.Tec.I, 1, 9-70, La Paz 1958
- PEÑARANDA, J.O.: Informe preliminar de la provincia Franz Tamajo (antes Caupolicán). - Consejo Nacional de Reforma Agraria, 42 S., La Paz 1972
- PERRY, L.D.: Flora Formation (Upper Cretaceous) of Northern Bolivia. - Bull.Amer.Ass.Petrol.Geol., 47, 10, 1855-1860, Tulsa/Okl. 1963
- PLAFKER, G.: Lineaments, joints and oriented lakes of Northeastern Bolivia. - IBP, 3, 3, 5-32, La Paz 1962
- Oriented Lakes and Lineaments of Northeastern Bolivia. - Geol.Soc.Amer.Bull., 75, 6, 503-522, Washington 1964
- PONCE DE LEON, V. & HOSCHTATTER, H.: Informe sobre la geología del sector central de la faja subandina (Rio Beni-St. Ana Huachi-San Borja). - YPFB, (informe inédito), La Paz 1968

- PUTZER, H.: Pleistozäne Aufschotterung und quartäre Tektonik am Saum und in intramontanen Becken der Anden. - Mitt.Geol.Inst.Techn.Univ. Hannover, H.8, 87-96, Hannover 1968
- RADELLI, L.: Ensayo de reconstrucción de la Cronoestratigrafía y de la Paleogeografía del Altiplano a de las Cordilleras Orientales de Bolivia después del Paleozoico superior. - Riv.Ital.Paleont., 70, 4, 833-868, Mailand 1964
- New data on Tectonics of Bolivian Andes from a photograph by Gemini 5 and field knowledges. - Trav.Lab.Géol., 42, 237-261, Grenoble 1966
- RIVAS, S.: Geología de la Región Norte del Lago Titicaca. - Serv.Geol.Bol., 2, 88 S., La Paz 1968
- Algunas novedades sobre la estratigrafía del ordovícico. - Soc.Geol.Bol., 15, 5-12, La Paz 1971
- RIVAS, S., FERNÁNDEZ, A. & ÁLVAREZ, R.: Estratigrafía de los sistemas ordovícico-cámbrico y precámbrico en Tarija, Sud de Bolivia. - Soc.Geol.Bol., 9, 27-44, La Paz 1969
- ROD, E.: Strike-slip-fault of continental importance in Bolivia. - Bull.Amer.Assoc.Petrol.Geol., 44, 107-108, Tulsa/Okl. 1960
- RODRIGO, G.L.A.: Informe preliminar sobre la estratigrafía y comportamiento de la Cuenca Cretácica de Bolivia Andina. - YPFB, (informe interno e inédito), La Paz 1964
- RODRIGUEZ, E.: Estudio de las ondas sísmicas en Peñas. - Tesis de Grado, Facultad de Geología - UMSA, 64, La Paz 1966

- RUSSO, A. & RODRIGO, G.I.A.: Estratigrafía y Paleogeografía del Grupo Puca en Bolivia. - IBP., 5, 3/4, 5-51, La Paz 1965
- SAAVEDRA, A.: Determinación de la Edad del Batolito de Unduavi. - Serv.Geol.Bol., 15, 44-46, La Paz 1971
- SCHAEFFER, B.: Cretaceous Fishes from Bolivia, with Comments on Pristid Evolution. - Amer.Mus.No-vitates, 2159, 20 S., New York 1963
- SCHLAGINWEIT, O.: Posición estratigráfica del yacimiento de hierro de Zapla y la difusión del horizonte glaciál de Zapla en la Argentina y en Bolivia. - Rev.Soc.Argent.Min.Geol., 13, 4, Buenos Aires 1943
- SCHLATTER, L. & NEDERLOF, M.: Bosquejo de la Geología y Paleogeografía de Bolivia. - Serv.Geol.Bol., 8, 49 S., La Paz 1966
- SCHNEIDER-SCHERBINA, A.: Über metallogenetische Epochen Boliviens und den hybriden Charakter der sogenannten Zinn-Silber-Formation. - Geol.Jb., 81, 157-170, Hannover 1962
- Geologie der Kupfervererzung im Altiplano. - Deutsche Geologische Mission in Bolivien, 44, 158 S., (unveröffentlicht), La Paz 1963
- SCHOOP, W.: Vergleichende Untersuchungen zur Agrarkolonisation der Hochlandindianer am Andenabfall und im Tiefland Ostboliviens. - Aachener Geographische Arbeiten, 4, 298 S., Wiesbaden 1970
- SIRVAS, F. & TORRES, E.: Consideraciones geológicas de la zona noroeste de la provincia Pacajes del Departamento de La Paz. - IBP., 6, 1, 54-64, La Paz 1966
- SONNENBERG, F.P.: Bolivia and the Andes, a geological sketch. - Bull.Assoc.Petrol.Geol., 45, 3, 408-409, Tulsa/OKl. 1961

- SONNENBERG, F.P.: Bolivia and the Andes. - Mem.Amer.Assoc. Petrol.Geol., 2, 36-46, Tulsa/Okla. 1963
- THORMANN, W.: Investigaciones preliminares sobre Tectónica y Metalogénesis en las Cordilleras Real y Quimsa Cruz. - Serv.Geol.Bol., 9, 64 S., La Paz 1968
- TROLI, C.: Forschungsreisen in den zentralen Anden von Bolivien und Peru. - Peterm.Mitt., 41, 218-222 (1927) und 100-103 (1928), Gotha 1927/1928
- Die Übersichtskarte der Cordillera Real. - Z.Ges.Erdkunde, 1931, 117-124, Berlin 1931
- Die tropischen Gebirge: Ihre dreidimensionale klimatische und pflanzengeographische Zonierung. - Bonner Geogr.Abh., 25, 93 S., Bonn 1959
- TROLL, C. & FINSTERWALDER, R.: Die Karten der Cordillera Real und des Talkessels von La Paz, Bolivien und die Diluvialgeschichte der zentralen Anden. - Peterm.Mitt., 81, 393-399 und 445-455, Gotha 1935
- TURNEAURE, F.S.: A Comparative Study of Major Ore Deposits of Central Bolivia. - Econ.Geol., 55, No.2, 217-254 (Part I) und No.3, 574-606 (Part II), Lancaster/Pa. 1960
- VARGAS, F.C. & MARIACA, B.J.: Informe sobre la Geología del sector meridional de la faja subandina del norte y una pequeña parte de la faja subandina central. - Informe GXG-YPFB, 1244, La Paz 1965
- VISTELIUS, A. & RUIZ FUJLER, C.: On the origin of variations in the composition of granitic rocks of Chile and Bolivia. - J.Intern.Assoc.Math. Geol., 1, 1, 113-114, New York 1969

- WOLFART, R. & VOGES, A.: Beiträge zur Kenntnis des Devons von Bolivien. - Beih.geol.Jb., 74, 14-20/24-25/211-215, Hannover 1968
- ZABALA, C.M.: Estudio geológico y mineralógico de la region de Milluni. - Tesis de Grado, Facultad de Geología - UMSA, 80, La Paz 1967
- ZAPATA, H.P.: Esfuerzos tangenciales y verticales en la evolución de los Andes Orientales (Coroico-Bolivia). - Serv.Geol.Bol., 15, 22-25, La Paz 1971

12.2. Literatur zur Luftbilddauswertung

- ADLER, R.: Über Klüfte und Kleinstörungen in ihrer Bedeutung für die Morphologie. - N.Jb.Geol. Paläont.Mh., 1957, 498-510, Stuttgart 1957
- ANDREWS, J.R.: A forest inventory of Ceylon. - A Canada Ceylon Colombo Projekt Government, Press. Ceylon (aus: SCHNEIDER, S.: "Luftbild und Luftbildinterpretation" - 1.Aufl., 530 S., (De Gruyter) Berlin/New York 1974)
- BERG, D.: Die Klüfte im Paläozoikum und Mesozoikum von Luxemburg und der westlichen Eifel. Ihre Beziehungen zur allgemeinen Tektonik und ihren Einfluß auf das Gewässernetz. - Publ.Serv.geol.Luxemburg, 16, 87 S., Luxemburg 1965
- BIGELOW, G.F.: Photographic interpretation keys - a reappraisal. - Photogramm.Eng., 29, 6, 1042-1051, Menasha 1963
- BIANCHET, P.H.: Development of fracture analysis as exploration method. - Bull.Amer.Ass.Petrol.Geol., 41, 8, 1748-1759, Menasha 1957

- BODECHTEL, J.: Photogeologische Untersuchungen über die Bruchtektonik im Toskanisch-Umbrischen Apennin. - Geol.Rdsch., 59, 1, 265-278, Stuttgart 1969
- BROWN, C.W.: Comparison of joints, faults and airphoto linears. - Amer.Ass.Petrol.Geol.Bul., 45, 11, 1888-1892, Menasha 1961
- BURGHART, R. et al.: Die Radialschlitztriangulation, eine Ausführung der Radialtriangulation. - Luftbild und Luftbildwesen, 29, Berlin 1944
- DEKER, H.: Theorie und Praxis des Stereotop. - Bildmessung und Luftbildwesen, 1956, 2, 56-67, Berlin 1956
- DINU, J.: Geologische Untersuchungen der Beziehungen zwischen den Gesteinsspalten, der Tektonik und dem hydrographischen Netz im östlichen Pfälzerwald (Hardt). - Verh.naturhist.-med.Ver.Heidelberg, N.F., 11, 238-299, Heidelberg 1912
- ENGSTLER, B.: Geologische Untersuchungen der Beziehungen zwischen den Gesteinsspalten, der Tektonik und dem hydrographischen Netz in den östlichen Mittelvogesen. - Verh.naturhist.-med.Ver.Heidelberg, N.F., 12, 372-416, Heidelberg 1913
- FINSTERWALDFR, R. & HOFMANN, W.: Photogrammetrie. - 3.Aufl., (De Gruyter), 455 S., Berlin 1968
- GHOSE, B. et al.: Quantitative geomorphology of drainage basins in the Central Luni Basin in Western Rajasthan. - 2.Geomorph., N.F., 11, 2, 146-160, Berlin 1967
- HAMANN, P.J.: Lineament analysis on aerial photographs. Exemplified in the North Sturgeon Lake area, Alberta. - W.Canad.Res.Publ., Ser.2, 1, 22 S., Calgary 1961

- HENDERSON, G.: Air-Photolineaments in Mpanda area, Western Province, Tanganyika, Afrika. - Bull. Amer.Ass.Petrol.Geol., 44, 1, 53-71, Menasha 1960
- HORTON, R.E.: Erosional development of streams and their drainage basins; Hydrophysical approach to quantitative morphology. - Geol.Soc.Amer. Bull., 56, 275-370, Baltimore 1945
- KUPSCH, W.O. & WILD, J.: Lineaments in Avonlea Area, Saskatchewan. - Amer.Assoc.Petrol.Geol.Bull., 42, 1, 127-134, Tulsa/Okl. 1958
- KRONBERG, P.: Zur großräumigen Erzprospektion mit Methoden der Photogeologie, Aero-Geophysik und Geochemie. - Erzmetall, 17, 8, 420-427, Stuttgart 1964
- Zur Anwendung photogeologischer Methoden in Kristallin-Gebieten. - N.Jb.Geol.Paläont., Abh., 129, 1, 105-112, Stuttgart 1967a
- Photogeologie. Eine Einführung in die geologische Luftbilddauswertung. - Clausthaler tekton.H., 6, 23 S., Clausthal-Zellerfeld 1967b
- LATTMAN, L.H.: Technique of mapping geologic fracture traces and lineaments on aerial-photographs. - Photogramm.Eng., 24, 4, 568-576, Menasha 1958
- LATTMAN, L.H. & MATZKE, R.H.: Geological significance of fracture traces. - Photogramm.Eng., 27, 3, 435-438, Menasha 1961
- LATTMAN, L.H. & NICKELSEN, R.P.: Photogeologic fracture-trace mapping in Appalachian plateau. - Amer.Ass. Petrol.Geol.Bull., 42, 9, 2238-2245, Menasha 1958

- LATTMAN, I.H. & SEGOVIA, A.V.: Analysis of fracture trace pattern of Adak and Kagalaska Islands, Alaska. - Amer.Ass.Petrol.Geol.Bull., 45, 2, 249-263, Menasha 1961
- LIND, J.G.: Geologische Untersuchungen der Beziehungen zwischen den Gesteinsspalten, der Tektonik und dem hydrographischen Netz des Gebirges bei Heidelberg. - Verh.naturhist.-med.Ver. Heidelberg, N.F., 11, 7-43, Heidelberg 1910
- LIST, F.K.: Zur Technik der photogeologischen Auswertung im Kalkalpinen Bereich (Heiterwand-Gebiet, östliche Lechtaler Alpen, Tirol). - Geol.Rdsch., 58, 1968, 196-219, Stuttgart 1968
- Quantitative Erfassung von Kluftnetz und Entwässerungsnetz aus dem Luftbild. - Bildmessung und Luftbildwesen, 4, 134-140, Karlsruhe 1969
- LIST, F.K. & HELMCKE, D.: Photogeologische Untersuchungen über lithologische und tektonische Kontrolle von Entwässerungssystemen im Tibesti-Gebirge (Zentral-Sahara, Tschad). - Bildmessung & Luftbildwesen, 38, 5, 273-278, Karlsruhe 1970
- LIST, F.K. & STOCK, P.: Photogeologische Untersuchungen über Bruchtektonik und Entwässerungsnetz im Präkambrium des nördlichen Tibesti-Gebirges, Zentral-Sahara, Tschad. - Geol.Rdsch., 59, 1, 228-256, Stuttgart 1969
- LOTZE, F.: Der Südteil des Göttinger Leinetalgrabens und der Eichenberger Grabenknoten. - Abh. preuß.geol.Landesanst., N.F., 139, 5-48, Berlin 1932

- MARCHESINI, E. et al.: Fracture pattern of the natural steam area of Larderello, Italy, from airphotographs. - Intern.Arch.Photogramm., 14, Transactions of the Symposium on Photo Interpretation, 524-532, Delft 1962
- MARSAI, D.: Statistische Methoden für Erdwissenschaftler. - 1.Aufl., 152 S., (Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Nägeli & Obermiller), Stuttgart 1967
- MAXWELL, J.C.: The bifurcation ratio in Horton's law (abstract). - Amer.Geophys.Union Trans., 36, 3, 520 S., Washington 1955
- MELTON, M.A.: Geometric properties of mature drainage systems and their representation in an E_4 phase space. - J.Geol., 66, 1, 35-56, Chicago 1958
- METZ, K.: Lehrbuch der tektonischen Geologie. - 2. Aufl., 357 S., (Enke), Stuttgart 1967
- MOLLARD, J.D.: Aerial photographs aid petroleum search. - Canadian Oil and Gas Inc., 10, 7, 89-96, 1957
- MORISAWA, M.E.: Quantitative geomorphology of some watersheds in the Appalachian plateau. - Geol. Soc.Amer.Bull., 73, 9, 1025-1046, Burlington 1962
- MURAWSKI, H.: Bau und Genese von Schwespatlagerstätten des Spessarts. - N.Jb.Geol.Paläont., Mh., 1954, 145-163, Stuttgart 1954
- PILLEWITZER, W.: Tektonik und Talverlauf im Kristallinengebiet der Raabklamm (Steiermark). - Z.Geomorph., 10, 69-86, Leipzig 1937
- POHLMANN, J.: Photogeologische und tektonische Untersuchungen im Rofan-Gebirge, Tirol/Österr. - Unveröffentlichte Diplomarbeit am FB 24 der FU Berlin, 91 S., Berlin 1971

- PRESSMAN, A.E.: Analysis of airphoto linear pattern in Eastern Massachusetts. - Photogramm.Eng., 29, 1, 193-198, Menasha 1963
- RAY, R.G.: Aerial photographs in geologic interpretation and mapping. - U.S.Geol.Survey Prof.Pap., 373, 230 S., Washington 1960
- RAY, R.G. & FISCHER, W.A.: Quantitative Photography - A Geologic Research Tool. - Photogramm.Eng., 26, 1, 143-150, Menasha 1960
- RENNER, J.G.A.: The structural significance of lineaments in the Eastern Monsech Area, Province of Lerida, Spain. - I.T.C.Publ., B 45, 27 S., Delft 1968
- RÖHRER, F.: Geologische Untersuchungen der Beziehungen zwischen den Gesteinsspalten, der Tektonik und dem hydrographischen Netz im nördlichen Schwarzwald und südlichen Kraichgau. I.Teil: Die gemeinen Klüfte und Harnische. - Jber.Mitt.oberrhein.geol.Verl., N.F., 6, 8-35, Karlsruhe 1916
- Geologische Untersuchungen der Beziehungen zwischen den Gesteinsspalten, der Tektonik und dem hydrographischen Netz im nördlichen Schwarzwald und südlichen Kraichgau. II.Teil: Bemerkungen zur Tektonik Südwestdeutschlands. - Jber.Mitt.oberrhein.geol. Verl., N.F., 11, 36-66, Karlsruhe 1922
- ROLAND, N.: Die Anwendung der Photointerpretation zur Lösung stratigraphischer und tektonischer Probleme im Bereich von Bardai und Aozou (Tibesti-Gebirge, Zentral-Sahara). - Berl. Geogr.Abh., 19, 47 S., Berlin 1973
- RONNER, F.: Systematische Klassifikation der Massengesteine. - 380 S., (Springer), Wien 1963
- SACHS, I.: Statistische Auswertungsmethoden. - 671 S., (Springer), Berlin 1968

- SADACCA, R.: Human factors in image interpretation. - Photogramm.Eng., 20, 6, 978-988, Menasha 1963
- SCHMIDT-THOMÉ, P.: Klufttektonische Beobachtungen in den Bayerischen Alpen. - Geologica Bavaria, 17, 5-16, München 1953
- SCHUMM, S.A.: Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey. - Geol.Soc.Amer.Bull., 67, 597-646, Baltimore 1956
- SHREVE, R.L.: Statistical law of stream numbers. - J. Geol., 74, 1, 17-37, Chicago 1966
- STOCK, P.: Photogeologische und tektonische Untersuchungen am Nordrand des Tibesti-Gebirges, Zentral-Sahara, Tschad. - Berl.Geogr.Abh., 14, 55 S., Berlin 1972
- STRAHLER, A.N.: Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. - Geol.Soc.Amer. Bull., 63, 1117-1142, Baltimore 1952
- TRICHERT, C.: Die Klufttektonik der cambro-silurischen Schichtentafel Estlands. - Geol.Rdsch., 18, 214-263, Berlin 1927
- THEIS, J.P.: A key link in the photogrammetric chain - the human being. - Photogramm.Eng., 20, 2, 253-257, Menasha 1963



Abb. 1: s. s. 32



Abh. 2: s. S. 34



Abb. 3: s.S. 35

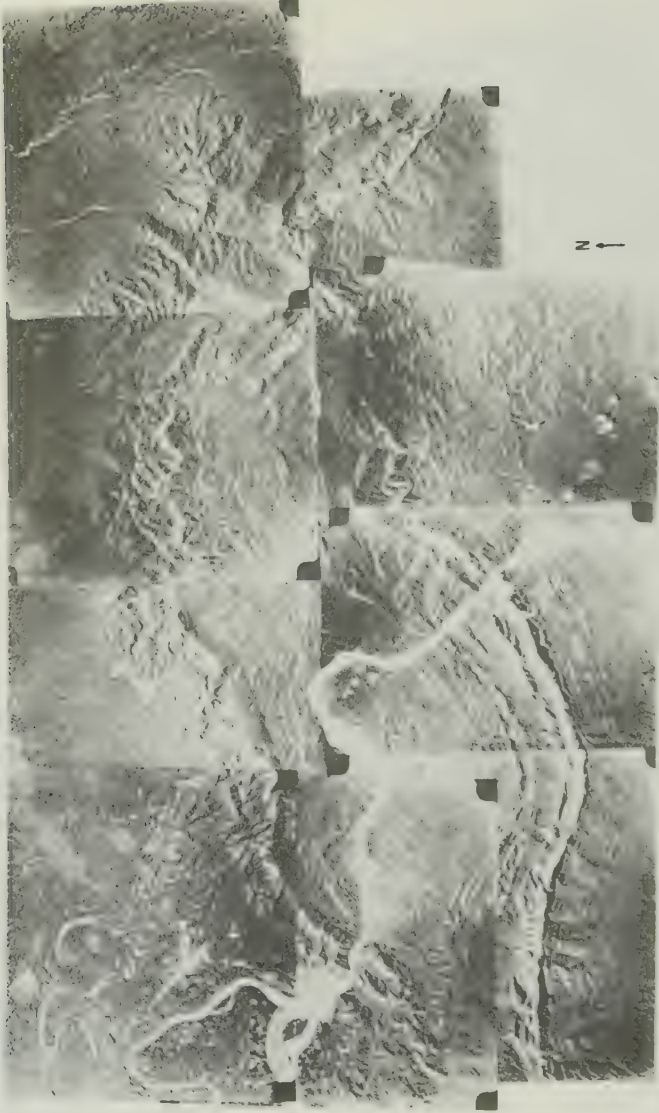


Figure 1: Map of the study area



450.11 s.S. 36



Abb. 6: s.s. 58

Abb.7:
s.S. 61



Abb.8:
s.S. 62

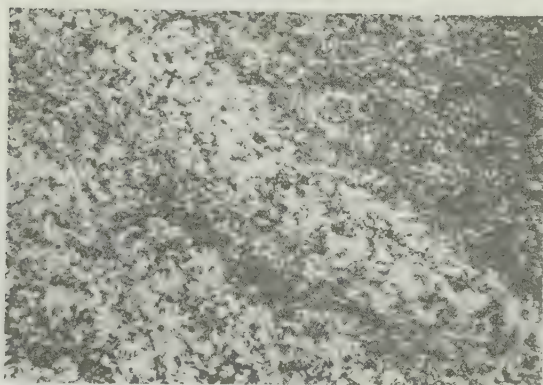


Abb.9:
s.S. 64

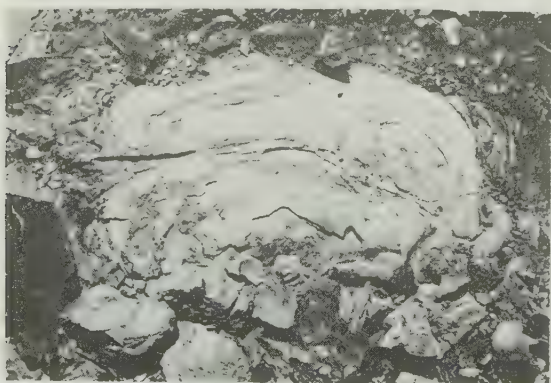


Abb.10:
s.S. 65

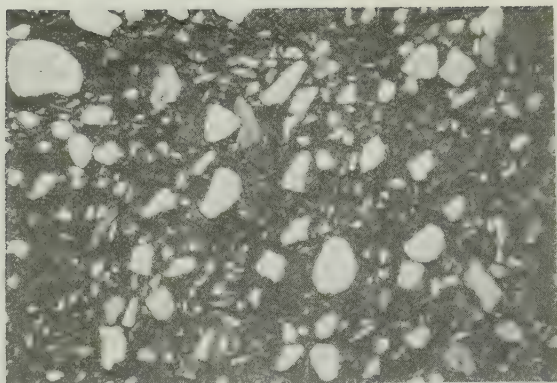


Abb.11:
s.S. 67



Abb.12:
s.S. 68

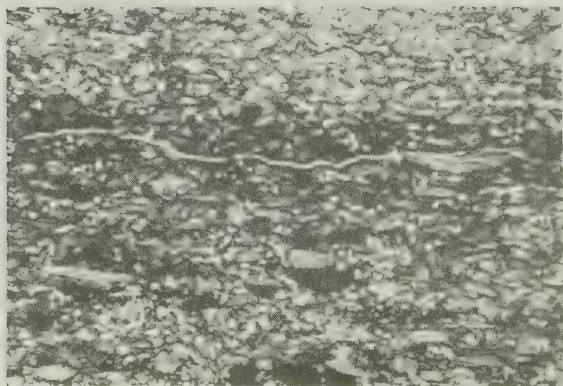


Abb. 13:
s.S. 68

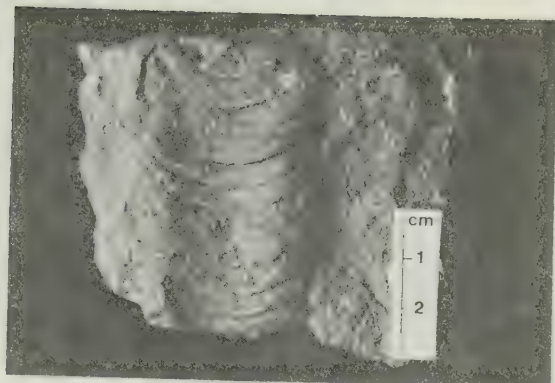


Abb. 14:
s.S. 71

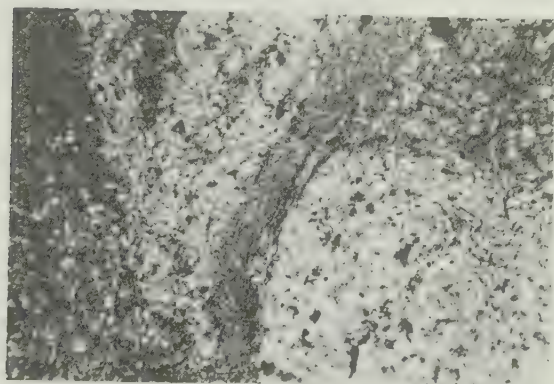


Abb. 15:
s.S. 75



Abb. 16:
s. S. 76

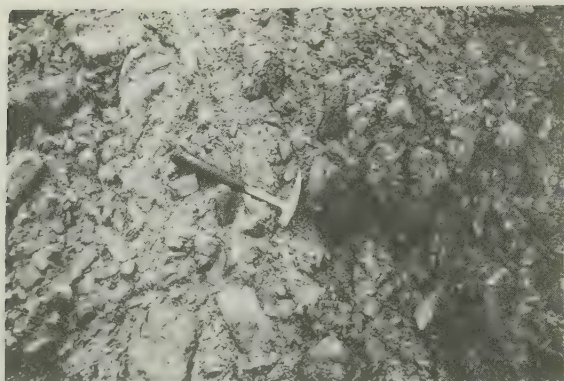


Abb. 17:
s. S. 76

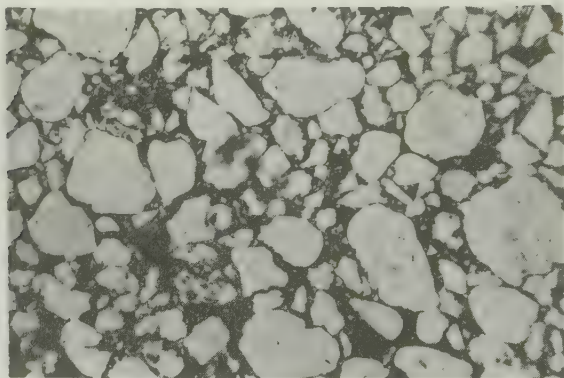


Abb. 18:
s. S. 78

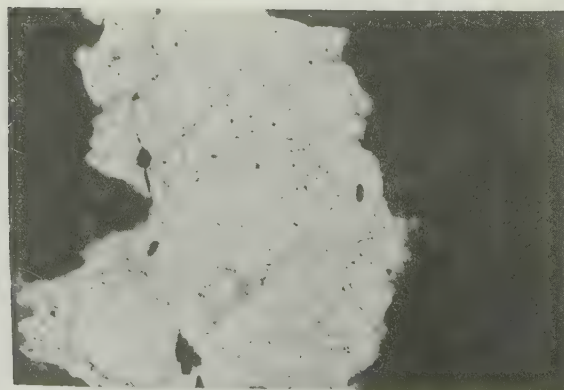


Abb.19:
s.S. 103

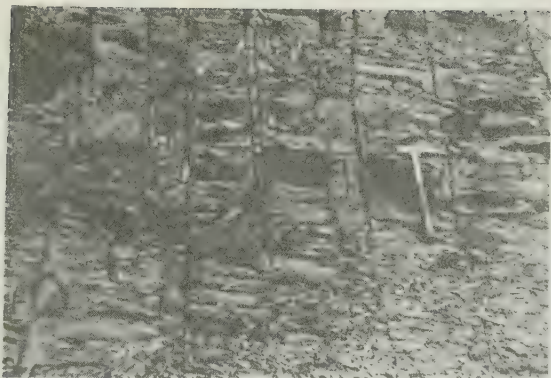


Abb.20:
s.S. 105

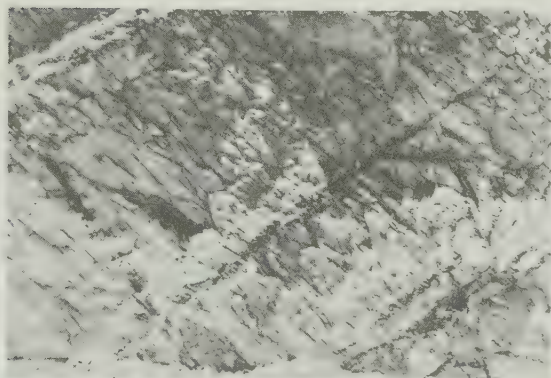


Abb.21:
s.S. 105

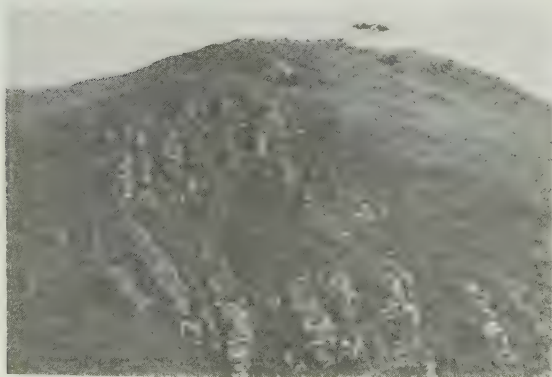




Fig. 108

Abb. 22:
s.S. 106

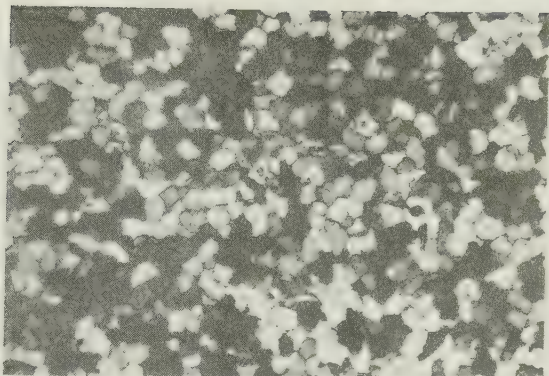


Abb. 24:
s.S. 130

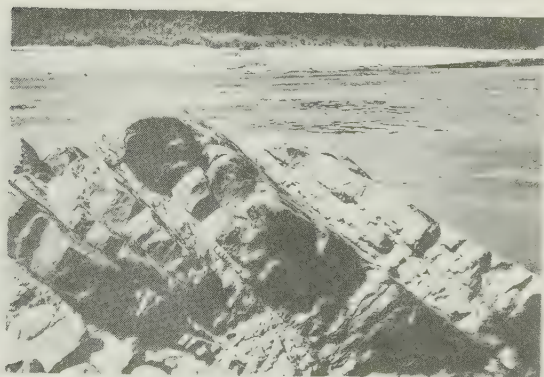
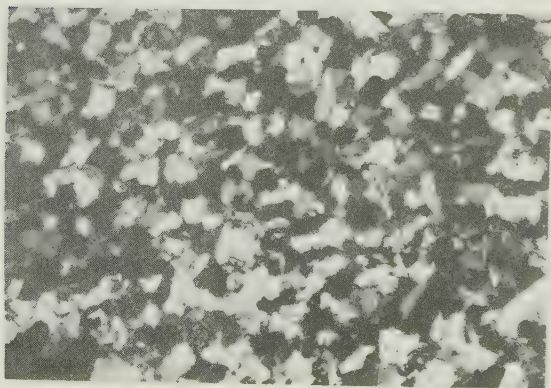


Abb. 25:
s.S. 132



13. ABBILDUNGEN

=====

- Abb. 1: Altiplanoebene mit der Hügelkette von Huilaque,
im NW von La Paz, Luftbild-Senkrechtaufnahme
(AMS/10-8-55/F-334/M-120/Bild-Nr. 20480)
- Abb. 2: Unkontrolliertes Photomosaik des Gebietes HUAYNA
POTOSI, Luftbild-Senkrechtaufnahmen
- Abb. 3: Unkontrolliertes Photomosaik des Gebietes APOIO,
Luftbild-Senkrechtaufnahmen
- Abb. 4: Unkontrolliertes Photomosaik des Gebietes RURRE-
NABAQUE, Luftbild-Senkrechtaufnahmen
- Abb. 5: Flächenhafte Urwaldbedeckung im Gebiet um RURRE-
NABAQUE, in der linken Bildseite der Rio Beni, im
Zentrum des Bildes abgestorbene Mäander des Rio
Beni und anthropogen bedingte Lichtungen im Urwald,
Luftbild-Senkrechtaufnahme (FO3-R16-Bild-Nr. 035)
- Abb. 6: Der westliche Teil des Gebietes HUAYNA POTOSI, im
Zentrum des Bildes das Milluni-Zongo-Tal, am oberen
Bildrand der Cerro Huayna Potosi-Granit, im NW von
La Paz, Luftbild-Senkrechtaufnahmen, Stereomodell
(AMS/28-5-56/F-335/M-167/Bild-Nr.28686/28687)
- Abb. 7: Feinsandig-tonige Schiefer des Ordoviz im Zongo-
Tal, im NW von La Paz
- Abb. 8: Ordoviz-Schiefer, Zongo-Tal im NW von La Paz, Probe: O₂-
Man erkennt Losungsbahnen von Limonit, die stark
auf ein Deformationsgefuge hinweisen,
Dünnschliff, Vergr. ca. 12,5x, // Nic.
- Abb. 9: Striemung bzw. Kritzung auf dem Zapla-Sedimentit,
Zongo-Tal im NW von La Paz
- Abb. 10: Zapla-Schiefer, Zongo-Tal im NW von La Paz, Probe: Z-
Schlecht klassierte Quarzkörner mit einem hetero-
genen Rundungsgrad in einer Ton-Glimmer-Matrix,
Dünnschliff, Vergr. ca. 12,5x, // Nic.
- Abb. 11: Feinsandig-tonige Schiefer des Silur, im S des
Cerro Huayna Potosi

- Abb.12: Silur-Schiefer, im S des Cerro Huayna Potosí, Probe: P₃-
Die Glimmer zeigen einen hohen Grad an Einregelung
in Richtung der Schichtung,
Dünnschliff, Vergr. ca. 12,5x, //Nic.
- Abb.13: Harringtonia cf. acutiplicata (KAYSER), Silur-Trilobit,
im W des Cerro Huayna Potosí, Handstück
- Abb.14: Devon-Schiefer, im W von La Paz, Probe: D-
Schlierig ausgezogene Hämatitpartikel und chaotisch
strukturierte Quarz-Glimmer-Tonmineralgehalte,
Dünnschliff, Vergr. ca. 12,5x, //Nic.
- Abb.15: Sandstein des Tertiärs, Huilaque, 0,5-5 m mächtige
Feinsandbänke
- Abb.16: Tertiär-Konglomerat, Huilaque, bis zu 30 cm große
Gerölle, zumeist gut gerundet und unsortiert
- Abb.17: Tertiär-Sandstein, Huilaque, Probe: T₁-
Subangulare bis gut gerundete Quarze und subangulare
Gesteinseinschlüsse aus feinkörnigen Quarziten und
glimmerhaltigen Sandsteinen,
Dünnschliff: Vergr. ca. 12,5x, //Nic.
- Abb.18: Granit, Cerro Huayna Potosí, Probe: GA-
Einschlußreiche Quarze, die gefeldert sind und
häufig undulös auslöschen,
Dünnschliff, Vergr. ca. 32x, ~~//~~ Nic.
- Abb.19: Klüfte im feinsandig-tonigen Ordoviz-Schiefer,
Tal von Apolo
- Abb.20: Limonit-Belag auf den Klüften im Devon-Schiefer,
Tal von Apolo
- Abb.21: Bis zu 1 m mächtige Sandsteinbänke im höheren Teil
der Devon-Schiefer, Tal von Apolo
- Abb.22: Devon-Schiefer, Tal von Apolo, Probe: 18-
Extrem dicht gepackte Quarze mit einer guten
Klassierung (0,1-0,2 mm)
Dünnschliff, Vergr. ca. 12,5x, //Nic.
- Abb.23: Ausschnitt aus dem Bearbeitungsgebiet Apolo, im oberen
Bildteil der Kreide-Sandstein der Altuncama-Bergkette,
im unteren Bildteil die Ordoviz-Schiefer des Tals von
Apolo, Luftbild-Senkrechtaufnahme (SMXE/6-26-63/
Vr.10-2-87)

Abb.24: Bis zu 5 m mächtige Bänke des Bala-Sandsteins
(Kreide), im S von Rurrenabaque

Abb.25: Quendeque-Sandstein (Tertiär), im S von Rurrenabaque,

Probe: Qu-

In dem serizitisch-limonitischen Zement erkennt man verzahnte Quarzkörner, klastische Helliglimmer, Turmaline und idiomorphe bis gut gerundete Zirkone, Dünnschliff, Vergr. 12,5x, //Nic.

14. FIGUREN

Seite

=====

Fig. 1: Die geologisch-morphologische Gliederung Bolivians (nach AHFFLD & SCHNEIDER-SCHERBINA, 1964)	8
Fig. 2: Flußdiagramm für einen Vergleich zweier Verteilungen anhand des SPEARMAN Rang-Korrelations-Tests und des Chi-Quadrat-Tests	23
Fig. 3: Häufigkeitsverteilungen zweier verschiedener Korrelationen	26
Fig. 4: Übersicht über die Lage und Größe der Arbeitsgebiete in den Departamenten LA PAZ und BENI, Bolivien	30
Fig. 5: Jahresdurchschnittstemperaturen in Bolivien von 1963 (mit den drei Bearbeitungsgebieten)	39
Fig. 6: Jahresdurchschnittsniederschläge in Bolivien von 1946-1960 (mit den drei Bearbeitungsgebieten)	40
Fig. 7: Maximum-Mittel-Minimum-Temperaturen im Gebiet Huayna Potosí	42
Fig. 8: Niederschlagsmenge im Gebiet Huayna-Potosí	42
Fig. 9: Relative Luftfeuchtigkeit im Gebiet Huayna Potosí	42
Fig.10: Windrichtung im Gebiet Huayna Potosí	42
Fig.11: Maximum-Mittel-Minimum-Temperaturen im Gebiet Apolo	45

	Seite
Fig.12: Niederschlagsmenge im Gebiet Apolo	45
Fig.13: Relative Luftfeuchtigkeit im Gebiet Apolo	45
Fig.14: Windrichtung im Gebiet Apolo	45
Fig.15: Maximum-Mittel-Minimum-Temperaturen im Gebiet Rurrenabaque	47
Fig.16: Niederschlagsmenge im Gebiet Rurrenabaque	47
Fig.17: Relative Luftfeuchtigkeit im Gebiet Rurrenabaque	47
Fig.18: Windrichtung im Gebiet Rurrenabaque	47
Fig.19: Vergleich der Maximum-Mittel-Minimum-Temperaturen in den drei Gebieten	49
Fig.20: Vergleich der Niederschlagsmengen in den drei Gebieten	49
Fig.21: Vergleich der relativen Luftfeuchtigkeit in den drei Gebieten	51
Fig.22: Vergleich der Windrichtungen in den drei Gebieten	51
Fig.23: Einteilung der Vegetationsformen in Bolivien (nach SCHOOP, 1970; in Anlehnung an TROLL, 1931 und 1959; HUECK, 1966)	53
Fig.24: Sedimentfolge im Gebiet Huayna Potosí	60
Fig.25: Schematische Querprofile durch die Gebiete Cerro Huayna Potosí im N und Huilaque im S des Arbeitsgebietes Huayna Potosí (Überhöhung 1 : 2)	87
Fig.26: Richtungsverteilung der im Gelände gemessenen Klüfte im Gebiet Huayna Potosí	88
Fig.27: Richtungsverteilung der im Luftbild gemessenen Klüfte im Gebiet Huayna Potosí	91
Fig.28: Meßbereiche I-XII zur Ermittlung der Entwässerungsdichte (D_E) und der Richtungsverteilung der Entwässerungssegmente im Gebiet Huayna Potosí	93
Fig.29: Richtungsverteilung der im Luftbild gemessenen Entwässerungssegmente im Gebiet Huayna Potosí	94/95
Fig.30: Sedimentfolge im Gebiet Apolo	101

	Seite
Fig.31: Schematisches Querprofil durch das Gebiet Apolo (Überhöhung 1 : 2)	112
Fig.32: Richtungsverteilung der im Luftbild gemessenen Klüfte im Gebiet Apolo	115
Fig.33: Meßbereiche I-VI zur Ermittlung der Entwässerungsdichte (D_F) und der Richtungsverteilung der Entwässerungssegmente im Gebiet Apolo	117
Fig.34: Richtungsverteilung der im Luftbild gemessenen Entwässerungssegmente im Gebiet Apolo	118
Fig.35: Sedimentfolge im Gebiet Rurrenabaque	124
Fig.36: Schematisches Querprofil durch das Gebiet Rurrenabaque (Überhöhung 1 : 2)	136
Fig.37: Richtungsverteilung der im Luftbild gemessenen Klüfte im Gebiet Rurrenabaque	139
Fig.38: Meßbereiche I-VI zur Ermittlung der Entwässerungsdichte (D_E) und der Richtungsverteilung der Entwässerungssegmente im Gebiet Rurrenabaque	142
Fig.39: Richtungsverteilung der im Luftbild gemessenen Entwässerungssegmente im Gebiet Rurrenabaque	143
Fig.40: Richtungsverteilung der im Luftbild gemessenen Klüfte in allen drei Gebieten	148
Fig.41: Richtungsverteilung der im Luftbild gemessenen Entwässerungssegmente in allen drei Gebieten	152

15. TABELLEN

Seite

=====

Tab. 1: Computerprogramm zur statistischen Auswertung von Kluft- und Entwässerungsnetzen, Teil 1: Einteilung in Gradklassen, Gesamtlänge, Prozentlänge, Gesamtanzahl, Prozentanzahl, Errechnung der Dichte, Gesamtlänge und Mittlere Länge	21
Tab. 2: Computerprogramm zur statistischen Auswertung von Kluft- und Entwässerungsnetzen, Teil 2: Errechnung des SPEARMAN Rang-Korrelationskoeffizienten und der Chi-Quadrate über der Länge und der Anzahl	25
Tab. 3: Vergleich der Kluftmeßbereiche der im Gelände gemessenen Klüfte anhand von SPEARMAN's Rang-Korrelations-Test im Gebiet Huayna Potosí	97
Tab. 4: Vergleich der Kluftmeßbereiche der im Luftbild gemessenen Klüfte anhand von SPEARMAN's Rang-Korrelations-Test im Gebiet Huayna Potosí	97
Tab. 5: Vergleich der SPEARMAN Rang-Korrelationskoeffizienten zwischen den Anzahlverteilungen der Kluftnetze anhand von Luftbild- und Geländemessungen	97
Tab. 6: Vergleich der Entwässerungsbereiche im Luftbild anhand des SPEARMAN Rang-Korrelations-Test im Gebiet Huayna Potosí	98
Tab. 7: Vergleich der Kluft- und Entwässerungsnetze in ihren Längen- und Anzahlverteilungen durch den SPEARMAN Rang-Korrelations-Test im Gebiet Huayna Potosí	98

Tab. 8: Vergleich der Längen- und Anzahlverteilungen der Kluft- und Entwässerungsnetze anhand des SPEARMAN Rang-Korrelations-Test und des Chi-Quadrat-Test im Gebiet Huayna Potosí	99
Tab. 9: Entwässerungsparameter im Gebiet Huayna Potosí	99
Tab.10: Vergleich der Kluftmeßbereiche der im Luftbild gemessenen Klüfte anhand des SPEARMAN Rang Korrelations-Test und des Chi-Quadrat-Test im Gebiet Apolo	121
Tab.11: Vergleich der Entwässerungsbereiche im Luftbild anhand des SPEARMAN Rang-Korrelations-Test und des Chi-Quadrat-Test im Gebiet Apolo	121
Tab.12: Vergleich der Kluft- und Entwässerungsnetze in ihren Längen- und Anzahlverteilungen durch den SPFARMAN Rang-Korrelations-Test im Gebiet Apolo	121
Tab.13: Vergleich der Längen- und Anzahlverteilungen der Kluft- und Entwässerungsnetze anhand des SPEARMAN Rang-Korrelations-Test und des Chi-Quadrat-Test im Gebiet Apolo	122
Tab.14: Entwässerungsparameter im Gebiet Apolo	122
Tab.15: Vergleich der Kluftmeßbereiche der im Luftbild gemessenen Klüfte anhand des SPEARMAN Rang-Korrelations-Test und des Chi-Quadrat-Test im Gebiet Rurrenabaque	145
Tab.16: Vergleich der Entwässerungsbereiche im Luftbild anhand des SPEARMAN Rang-Korrelations-Test und des Chi-Quadrat-Test im Gebiet Rurrenabaque	145

	Seite
Tab.17: Vergleich der Kluft- und Entwässerungsnetze in ihren Längen- und Anzahlverteilungen durch den SPEARMAN Rang-Korrelations-Test im Gebiet Rurrenabaque	145
Tab.18: Vergleich der Längen- und Anzahlverteilungen der Kluft- und Entwässerungsnetze anhand des SPEARMAN Rang-Korrelations-Test und des Chi- Quadrat-Test im Gebiet Rurrenabaque	146
Tab.19: Entwässerungsparameter im Gebiet Rurrenabaque	146
Tab.20: Vergleich der Klüftigkeit (K) und Kluftdichte (D_K) der einzelnen stratigraphischen Einheiten in den drei Gebieten	150
Tab.21: Vergleich der Entwässerungsdichten (D_E) und Mittleren Längen (L_M) der Entwässerungsnetze in allen drei Bearbeitungsgebieten	155

16. ANLAGEN
=====

Anlage 1: Photogeologische Karte "HUAYNA POTOSÍ - Teil A:
CERRO HUAYNA POTOSÍ" (Maßstab -1 : 100.000)

Anlage 2: Photogeologische Karte (Entwässerungsnetz) "HUAYNA
POTOSÍ - Teil A: CERRO HUAYNA POTOSÍ"
(Maßstab -1 : 100.000)

Anlage 3: Photogeologische Karte "HUAYNA POTOSÍ - Teil B:
HUJLAQUE" (Maßstab -1 : 100.000)

Anlage 4: Photogeologische Karte (Entwässerungsnetz) "HUAYNA
POTOSÍ - Teil B: HUJLAQUE" (Maßstab -1 : 100.000)

Anlage 5: Photogeologische Karte "APOLO"
(Maßstab -1 : 100.000)

Anlage 6: Photogeologische Karte (Entwässerungsnetz)
"APOLO" (Maßstab -1 : 100.000)

Anlage 7: Photogeologische Karte "RURRENABAQUE"
(Maßstab -1 : 100.000)

Anlage 8: Photogeologische Karte (Entwässerungsnetz)
"RURRENABAQUE" (Maßstab -1 : 100.000)

Aus reproduktionstechnischen Gründen wurden die photogeolo-
gischen Originalkarten (Maßstab 1 : 50.000) auf den Maßstab
-1 : 100.000 verkleinert.

L e b e n s l a u f

Am 12.08.1947 wurde ich in Berlin-Spandau als Sohn des Katecheten Heinz Pohlmann und seiner Ehefrau Maria, geb. Wiesner, geboren.

Von 1954 bis 1960 besuchte ich die Grundschule in Berlin. Ostern 1960 trat ich in das Kant-Gymnasium in Berlin/Spandau ein, an dem ich im Februar 1967 mein Abitur ablegte.

Im April 1967 wurde ich an der Freien Universität Berlin immatrikuliert und begann mit dem Studium der Geologie.

Die Diplom-Vorprüfung in Geologie habe ich im Mai 1969, die Diplom-Hauptprüfung im Juli 1971 abgelegt.

Die Arbeit an der Dissertation begann ich im Sommer 1972. Seit Oktober 1975 arbeite ich als Teilzeitassistent am Institut für Allgemeine Geologie der FU Berlin.

Meine akademischen Lehrer waren:

G.BISCHOFF, J.BRANDENBURG, H.BRÜHL, W.BÜSCH, W.FRANKE, R.FRYDRYCH, K.GERMANN, P.GIESE, W.GOCHT, K.GÖRLER, G.HAHN, R.HEIMANN, H.IBBEKEN, V.JACOBSHAGEN, K.F.JAHR, B.KREBS, W.KÜHNE, C.KUHNERT, J.LIEDHOLZ, F.K.LIST, K.R.MEHNERT, M.RICHTER, H.J.SCHNEIDER, W.SKALA, A.WILLGALLIS.

